



# UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO

## FACULTAD DE INGENIERIA QUÍMICA

### ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA



**EFICIENCIA DEL *Opuntia ficus-indica* CON SULFATO DE  
ALUMINIO PARA LA CLARIFICACIÓN DEL AGUA RESIDUAL  
EN UNA INDUSTRIA LÁCTEA DE LA REGIÓN DE PUNO**

**TESIS**

**PRESENTADA POR:**

**AMELIA HUARAHUARA RAMOS**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

**INGENIERO QUÍMICO**

**PUNO - PERÚ**

**2024**



# AMELIA HUARAHUARA RAMOS

## EFICIENCIA DEL *Opuntia ficus-indica* CON SULFATO DE ALUMINIO PARA LA CLARIFICACIÓN DEL AGUA RESIDUAL

Universidad Nacional del Altiplano

### Detalles del documento

Identificador de la entrega  
trn:oid:::8254:416954154

Fecha de entrega  
17 dic 2024, 12:20 p.m. GMT-5

Fecha de descarga  
17 dic 2024, 12:32 p.m. GMT-5

Nombre de archivo  
TESIS EFICIENCIA DEL OPUNTIA FICUS-INDICA CON SULFATO DE ALUMINIO PARA LA CLARIFICA....docx

Tamaño de archivo  
7.1 MB

102 Páginas

16,634 Palabras

91,433 Caracteres



## 10% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

### Filtrado desde el informe

- ▶ Bibliografía
- ▶ Texto citado
- ▶ Texto mencionado
- ▶ Coincidencias menores (menos de 12 palabras)

### Fuentes principales

- 9% Fuentes de Internet
- 1% Publicaciones
- 7% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

### Marcas de integridad

#### N.º de alerta de integridad para revisión

- Caracteres reemplazados**  
23 caracteres sospechosos en N.º de páginas  
Las letras son intercambiadas por caracteres similares de otro alfabeto.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Universidad Nacional del Altiplano Firmado digitalmente por BOZA CONDORENA Edwin Guido FAU 20145496170 soft  
Motivo: Soy el autor del documento  
Fecha: 17.12.2024 23:48:16 -05:00

Universidad Nacional del Altiplano Firmado digitalmente por QUILLE CALIZAYA German FAU 20145496170 soft  
Motivo: Soy el autor del documento  
Fecha: 17.12.2024 12:41:48 -05:00





## DEDICATORIA

Este trabajo de tesis está dedicado en primera instancia a Dios, por regalarme a una madre maravillosa Lidia que me acompaña en cada paso que doy, por su constante lucha de ayudarme a lograr mis objetivos y metas para poder concluir mi carrera profesional, mi éxito académico es el fruto de sus enseñanzas y cariño incondicional.

A mi padre y hermanas por su apoyo moral y su valiosa compañía en el proceso de la culminación de mi trabajo de investigación.

A mi novio Hernan, que con sus palabras de aliento han contribuido para el logro de mis metas, así mismo su apoyo incondicional en el proceso de esta investigación dándome ánimos constantes hasta su culminación.

**Amelia Huarahuara Ramos**



## AGRADECIMIENTOS

Agradezco primordialmente a Dios, por darme la fortaleza de no rendirme y seguir adelante.

A mi familia quienes, gracias a su constante apoyo, amor y comprensión me guían por el camino de la vida como persona y profesional.

A la facultad de Ingeniería Química de la UNAP y los catedráticos por su contribución a través de sus conocimientos y experiencias para la formación de profesionales de éxito.

A mi asesor de tesis Dr. Edwin Guido Boza Condorena, por sus conocimientos, sugerencias y recomendaciones en el proceso de esta investigación.

Deseo manifestar mi profundo agradecimiento hacia todas aquellas personas que han colaborado de alguna manera en la elaboración de esta tesis.

**Amelia Huarahuara Ramos**



# ÍNDICE GENERAL

	Pág.
<b>DEDICATORIA</b>	
<b>AGRADECIMIENTOS</b>	
<b>ÍNDICE GENERAL</b>	
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b>	
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>	
<b>ÍNDICE DE ANEXOS</b>	
<b>ACRÓNIMOS</b>	
<b>RESUMEN .....</b>	<b>14</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>15</b>
<b>CAPÍTULO I</b>	
<b>INTRODUCCIÓN</b>	
<b>1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....</b>	<b>18</b>
1.1.1. Problema general.....	19
1.1.2. Problemas específicos .....	19
<b>1.2. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>20</b>
1.2.1. Objetivo general .....	20
1.2.2. Objetivos específicos .....	20
<b>1.3. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>20</b>
1.3.1. Hipótesis general .....	20
1.3.2. Hipótesis específicas .....	20
<b>1.4. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>21</b>

## CAPÍTULO II

### REVISIÓN DE LITERATURA



<b>2.1.</b>	<b>ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>24</b>
2.1.1.	A nivel internacional .....	24
2.1.2.	A nivel nacional .....	27
2.1.3.	A nivel regional .....	29
<b>2.2.</b>	<b>MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>30</b>
2.2.1.	Aguas residuales industriales .....	30
2.2.2.	Efluente de aguas residuales lácteas .....	31
2.2.3.	Contaminación que causa efectos de las aguas residuales lácteas .....	31
2.2.4.	Vertido al alcantarillado .....	31
2.2.5.	Impactos ambientales de una planta quesera .....	32
2.2.6.	Lactosueros .....	33
2.2.7.	Propiedades fisicoquímicas del lactosuero.....	34
2.2.8.	Formas de tratar las aguas residuales de lácteos .....	35
2.2.9.	Tratamiento de aguas residuales .....	35
2.2.10.	Tratamiento de aguas residuales lácteas.....	35
2.2.11.	Coagulación y floculación.....	36

### **CAPÍTULO III**

#### **MATERIALES Y MÉTODOS**

<b>3.1.</b>	<b>LUGAR DEL ESTUDIO .....</b>	<b>46</b>
<b>3.2.</b>	<b>TIPO DE INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>47</b>
<b>3.3.</b>	<b>POBLACIÓN .....</b>	<b>47</b>
<b>3.4.</b>	<b>MUESTRA.....</b>	<b>47</b>
<b>3.5.</b>	<b>MATERIALES, EQUIPOS Y REACTIVOS .....</b>	<b>48</b>
3.5.1.	Materiales .....	48
3.5.2.	Equipos.....	49



3.5.3. Reactivos .....	49
<b>3.6. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL .....</b>	<b>49</b>
3.6.1. Metodología para la determinación de las características fisicoquímicas del agua residual.....	49
3.6.2. Metodología para obtener el coagulante natural y determinar la eficiencia de la remoción de la turbidez .....	52
3.6.3. Metodología para la determinación de las condiciones óptimas de remoción de turbidez.....	56

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

<b>4.1. RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN DEL AGUA RESIDUAL INICIAL Y FINAL .....</b>	<b>62</b>
<b>4.2. RESULTADOS DE LA OBTENCIÓN DEL COAGULANTE NATURAL DE PENCA DE TUNA Y LA EFICIENCIA DE LA REMOCIÓN DE LA TURBIDEZ.....</b>	<b>63</b>
<b>4.3. RESULTADOS DE LAS CONDICIONES ÓPTIMAS DE REMOCIÓN DE TURBIDEZ.....</b>	<b>67</b>
4.3.1. Diseño experimental.....	67
<b>V. CONCLUSIONES.....</b>	<b>79</b>
<b>VI. RECOMENDACIONES .....</b>	<b>80</b>
<b>VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>81</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>90</b>

**ÁREA:** Tecnologías ambientales y recursos naturales

**TEMA:** Eficiencia del *Opuntia ficus-indica* con sulfato de aluminio para la clarificación del agua residual en una industria láctea de la región de puno

**FECHA DE SUSTENTACIÓN:** 26 de diciembre del 2024





## ÍNDICE DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
<b>Tabla 1</b> Impactos ambientales en la fabricación de quesos .....	32
<b>Tabla 2</b> Composición del lactosuero dulce y acido .....	34
<b>Tabla 3</b> Ubicación del punto de muestreo .....	46
<b>Tabla 4</b> Método de análisis .....	50
<b>Tabla 5</b> Dosis de coagulantes .....	56
<b>Tabla 6</b> Rangos y niveles correspondientes a las variables del diseño Box-Behnken .....	58
<b>Tabla 7</b> Matriz del diseño experimental de Box-Behnken para 3 variables. ....	59
<b>Tabla 8</b> Análisis de varianza del modelo de regresión de segundo orden. ....	61
<b>Tabla 9</b> Resultados iniciales .....	62
<b>Tabla 10</b> Características del coagulante sólido.....	64
<b>Tabla 11</b> Dosis de coagulantes .....	64
<b>Tabla 12</b> Características de tratamiento en la prueba de jarras .....	65
<b>Tabla 13</b> Resultados de la turbidez y porcentaje de remoción .....	65
<b>Tabla 14</b> Matriz del diseño de Box-Behnken y respuestas observadas. ....	68
<b>Tabla 15</b> Coeficientes de regresión del modelo ajustado para la remoción de turbidez. .....	72
<b>Tabla 16</b> Análisis de varianza del modelo de regresión de segundo orden para la remoción de turbidez .....	73



## ÍNDICE DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
<b>Figura 1</b> Obtención de lactosuero.....	33
<b>Figura 2</b> Zona de coagulación .....	38
<b>Figura 3</b> Opuntia Ficus -indica.....	42
<b>Figura 4</b> Ubicación del punto de muestreo.....	46
<b>Figura 5</b> Toma de muestra del efluente .....	48
<b>Figura 6</b> Lectura de pH.....	51
<b>Figura 7</b> Determinación de la turbidez .....	52
<b>Figura 8</b> Secado de Tuna (Opuntia ficus-indica).....	54
<b>Figura 9</b> Obtención del coagulante natural.....	54
<b>Figura 10</b> Tratamiento en la prueba de jarras.....	55
<b>Figura 11</b> Gráfico de efectos de las variables para la remoción de turbidez.....	70
<b>Figura 12</b> Gráfico de interacción de las para la remoción de turbidez.....	71
<b>Figura 13</b> Gráfica de superficie de respuesta y contorno para el efecto de la relación sulfato de aluminio/ Opuntia ficus-indica y velocidad de mezcla rápida para la remoción de turbidez.....	76
<b>Figura 14</b> Gráfica de superficie de respuesta y contorno para el efecto de la relación de sulfato de aluminio/ Opuntia ficus-indica y pH para la remoción de turbidez.....	77
<b>Figura 15</b> Gráfica de superficie de respuesta y contorno para la velocidad de mezcla rápida y pH para la remoción de turbidez.....	78
<b>Figura 16</b> Ubicación del punto de muestreo.....	96
<b>Figura 17</b> Toma de muestra.....	96



<b>Figura 18</b>	Tratamiento el Test de Jarras .....	97
<b>Figura 19</b>	Comparación de turbidez inicial frente al tratamiento.....	97
<b>Figura 20</b>	Gráfico de superficie de respuesta y contorno para el efecto de la relación de sulfato de aluminio/Opuntia ficus-indica y mezcla rápida para la remoción de turbidez.....	98
<b>Figura 21</b>	Gráfico de superficie de respuesta y contorno para el efecto de la relación de sulfato de aluminio/Opuntia ficus-indica y pH para la remoción de turbidez .....	98
<b>Figura 22</b>	Gráfico de superficie de respuesta y contorno para la velocidad de mezcla rápida y pH para la remoción de turbidez .....	99



## ÍNDICE DE ANEXOS

<b>ANEXO 1.</b> Turbiedad final de las muestras de agua residual de la Cooperativa de servicios San Santiago, Acora-Puno.....	90
<b>ANEXO 2.</b> Informe de resultados .....	91
<b>ANEXO 3.</b> Evidencias fotográficas .....	96
<b>ANEXO 4.</b> Gráficas de superficie de respuesta y contorno .....	98
<b>ANEXO 5.</b> Declaración jurada de autenticidad de tesis .....	100
<b>ANEXO 6.</b> Autorización para el depósito de tesis en el Repositorio Institucional.....	101



## ACRÓNIMOS

**°C:** Grados Celsius

**E:** Este

**mg/l:** Miligramos por litro

**N:** Norte

**L:** Litros

**SM:** Métodos estandarizados

**T:** Temperatura

**%:** Porcentaje

**NTU:** Unidades nefelométricas de turbidez

**pH:** Potencial de hidrogeno

**LMP:** Límite máximo permisible



## RESUMEN

En la presente investigación el objetivo general fue determinar la eficiencia de penca de tuna (*Opuntia ficus indica*) y Sulfato de aluminio para la clarificación del agua residual de la Cooperativa de servicios San Santiago – Acora. Metodología: Para la determinación de las características fisicoquímica de las aguas residuales se utilizaron métodos de análisis de aguas residuales y potables (APHA, 2005). El coagulante natural se obtuvo aplicando el método propuesto en la literatura Chuiza et al (2019), la efectividad de los coagulantes se determinó mediante el método de test de jarras. Las condiciones óptimas que maximicen la remoción de la turbidez se utilizó la metodología de superficie de respuesta con el diseño experimental Box-Behnken. Resultados: una turbidez inicial del agua residual de 727 NTU. La evaluación de las diferentes combinaciones de concentraciones y condiciones operativas permitió reducir la turbidez del agua residual a 2,33 NTU niveles por debajo de los límites máximos permisibles establecidos en el Reglamento de Calidad del Agua para Consumo Humano del Perú. En la optimización las variables clave fueron: relación sulfato de aluminio/ *Opuntia ficus-indica* 1,5; velocidad de mezcla rápida 150 rpm y pH 7, estos parámetros permitieron una remoción máxima del 99,68%. Se concluye que el coagulante natural en combinación con sulfato de aluminio es altamente efectivo para la remoción de turbidez, las variables estudiadas tienen un impacto significativo en la eficiencia del proceso, siendo crucial su control.

**Palabras clave:** Clarificación, industria láctea, *Opuntia ficus-indica*, Remoción, Sulfato de aluminio



## ABSTRACT

The general objective of this research was to determine the efficiency of prickly pear cactus (*Opuntia ficus-indica*) and aluminum sulfate for the clarification of wastewater from the San Santiago – Acora Cooperative of Services. Methodology: The physicochemical characteristics of the wastewater were determined using wastewater and drinking water analysis methods (APHA, 2005), the natural coagulant was obtained by applying the method proposed in the literature by Chuiza et al (2019), the effectiveness of the coagulants was determined by the jar test method, the optimal conditions that maximize turbidity removal were determined by the response surface methodology with the Box-Behnken experimental design. Results: The average initial turbidity of the wastewater was 727 NTU, the evaluation of the different combinations of concentrations and operating conditions allowed to reduce the turbidity of the wastewater to 2,33 NTU levels lower than the maximum permissible limits established in the Water Quality Regulations for Human Consumption of Peru; In the optimization, the key variables were: aluminum sulphate/*Opuntia ficus-indica* ratio 1.5; fast mixing speed 150 rpm and pH=7, these parameters allowed a maximum removal of 99.68%. It is concluded that the natural coagulant in combination with aluminum sulphate is highly effective in removing turbidity. The variables studied have a significant impact on the efficiency of the process and their control is crucial.

**Keywords:** Clarification, dairy industry, *Opuntia ficus-indica*, Removal, Aluminum sulphate



# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

El agua es esencial para todas las actividades humanas, diariamente se producen toneladas de aguas residuales a medida que crece la población humana en sectores doméstico, industrial y agrícola. Por lo tanto la contaminación del agua se ha convertido en una preocupación (Tayawi et al., 2023). La creciente demanda de productos lácteos en el mercado ha impulsado el desarrollo de la industria láctea. La cual genera grandes cantidades de aguas residuales. Si estas aguas se vierten sin el tratamiento adecuado, contaminan gravemente los cuerpos de agua receptores (Shete & Shinkar, 2013), ya que la industria láctea es uno de esos sectores con un fuerte potencial contaminante (Custodio et al., 2022) y la eliminación de aguas residuales industriales tratadas inadecuadamente o sin tratar conduce a la contaminación ambiental, contaminación del agua, contaminación del aire (Tompe & Wagh, 2017). Las aguas residuales de la industria láctea se generan principalmente en las operaciones de limpieza y lavado en plantas queseras. Se estima que alrededor del 2% del total de la leche procesada se desperdicia en el desagüe (Bairagi & Rastogi, 2015). La disminución de la disponibilidad de fuentes de agua dulce nos ha llevado a pensar en la dirección del reciclaje y reutilización de aguas residuales industriales (Agrawal & Sarode, 2021).

El tratamiento de las aguas residuales en la industria láctea generalmente implica procesos físicos, químicos y biológicos. Entre estos, la coagulación y la floculación se ha consolidado como un método efectivo para la clarificación del agua, permitiendo la remoción de sólidos suspendidos y la reducción de turbidez. El proceso de coagulación y floculación es estudiado a nivel de laboratorio, realizando las pruebas de jarra al lactosuero, en esta investigación se empleó un coagulante natural *Opuntia ficus-indica* y





un coagulante químico Sulfato de aluminio. Tradicionalmente, se utilizan este tipo de coagulantes, los cuales, son efectivos. Uno de los enfoques emergentes es el uso de coagulantes naturales, como la *Opuntia ficus-indica*, conocida comúnmente como tuna, que ha demostrado ser un coagulante efectivo en el tratamiento de aguas residuales. Este recurso natural, ampliamente disponible en zonas rurales de Perú, es reconocido por su capacidad para aglutinar partículas suspendidas, lo que facilita su eliminación del agua. La combinación de coagulantes naturales con coagulantes químicos, como el sulfato de aluminio, podría mejorar la eficiencia de los procesos de clarificación, al tiempo que se reduce el impacto ambiental de los productos químicos utilizados.

El presente estudio se propone evaluar la eficiencia del uso combinado de *Opuntia ficus-indica* y sulfato de aluminio en la clarificación del agua residual generada por la Cooperativa de Servicios San Santiago – Acora, una planta láctea de la región de Puno. Se busco optimizar las concentraciones de ambos coagulantes, así como las condiciones de agitación, con el fin de reducir la turbidez y mejorar la calidad del agua tratada.

La importancia de este trabajo radica en la posibilidad de ofrecer una alternativa viable, económica y sustentable para la industria láctea local, contribuyendo tanto a la protección del medio ambiente como a la gestión eficiente de recursos hídricos en una región que enfrenta desafíos relacionados con el acceso y la calidad del agua. Al mismo tiempo, este estudio puede servir como referencia para la implementación de técnicas de tratamiento de agua en otras zonas rurales del país.

El presente proyecto de investigación está contenido por los siguientes capítulos: Capítulo I. Introducción; que aborda la identificación del problema, los objetivos de la investigación, hipótesis de la investigación y justificación de la investigación; Capítulo II. Revisión literaria sección que aborda los antecedentes de la investigación, el marco



teórico; Capítulo III, consta de los materiales y métodos, en donde se observa el lugar de estudio, la población la muestra, el método de investigación y la descripción detallada de métodos por objetivos específicos. Capítulo IV, resultados y discusión seguidamente de las conclusiones, recomendaciones, además la bibliográficas y los anexos.

## **1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

A nivel mundial, la gestión de las aguas residuales industriales ha sido un desafío creciente debido al incremento de la producción y consumo de productos lácteos (Ramirez, 2023). La industria láctea genera grandes volúmenes de agua residual que contiene una alta carga de materia orgánica, grasas, proteínas y nutrientes, lo que presenta un riesgo al medio ambiente. La descarga directa de aguas residuales a cuerpos de agua sin ningún tratamiento previo es la causa principal de la contaminación del agua (Messaoudi et al., 2023). Varios factores contribuyen a la contaminación del agua, por lo tanto los recursos hídricos en esta situación deben protegerse continuamente (Tayawi et al., 2023). Frente a este problema, existe un creciente interés en alternativas más sostenibles y ecológicas, como el uso de coagulantes naturales. Investigaciones recientes han explorado el uso de extractos vegetales como *Opuntia ficus-indica*, que ha demostrado ser un coagulante efectivo para la reducción de turbidez y sólidos suspendidos en aguas residuales.

En el Perú la industria láctea es un sector importante para la economía nacional, especialmente en regiones rurales donde se concentran muchas de las plantas procesadoras de lácteos. Debido al crecimiento económico, la actividad quesera en el Perú se ha incrementado, dejando como subproducto el lactosuero en cantidades significativas, este residuo se vierte directamente al drenaje, lo que genera un problema ambiental (Quispe, 2018).



En la región de Puno, la industria láctea es una de las principales actividades económicas, especialmente en zonas rurales como Acora. Sin embargo, muchas plantas procesadoras de lácteos no cuentan con sistemas adecuados para el tratamiento de sus aguas residuales, lo que ha provocado una creciente preocupación por el impacto ambiental en los recursos hídricos locales, incluyendo lagos, ríos y acuíferos. Las aguas residuales generadas por estas plantas presentan altos niveles de sólidos suspendidos, materia orgánica y nutrientes, lo que puede afectar la calidad del agua y la salud de las comunidades cercanas.

A raíz de lo mencionado se formula la siguiente interrogante

#### **1.1.1. Problema general**

- ¿Cuál será la eficiencia de la mezcla de los coagulantes (*Opuntia ficus-indica* – sulfato de aluminio) para el aclaramiento de agua residual de la Cooperativa de servicios San Santiago - Acora?

#### **1.1.2. Problemas específicos**

- ¿Cuáles serán las características fisicoquímicas iniciales y finales luego del tratamiento, del agua residual de la Cooperativa de servicios San Santiago - Acora?
- ¿Cuál será el proceso para la obtención del coagulante natural *Opuntia ficus-indica*, y cómo será la eficiencia del tratamiento?
- ¿Cuál será la dosis del sulfato de aluminio/*Opuntia ficus-indica*, la velocidad de agitación y el pH adecuado para la remoción de turbidez del agua residual de la Cooperativa?



## 1.2. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

### 1.2.1. Objetivo general

- Determinar la eficiencia de la mezcla de dos coagulantes penca de tuna (*Opuntia ficus-indica*) y Sulfato de aluminio para la clarificación del agua residual la Cooperativa de servicios San Santiago – Acora.

### 1.2.2. Objetivos específicos

- Determinar las características fisicoquímicas iniciales y finales luego del tratamiento, del agua residual de la Cooperativa de servicios San Santiago – Acora.
- Obtener el coagulante natural a partir de la penca de Tuna y efectuar pruebas para determinar la eficiencia del tratamiento.
- Determinar la dosis del sulfato de aluminio/*Opuntia ficus-indica*, así como la velocidad de agitación y el pH adecuado para la remoción de turbidez del agua residual de la Cooperativa.

## 1.3. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

### 1.3.1. Hipótesis general

- La mezcla de coagulantes penca de tuna (*Opuntia ficus-indica*) – Sulfato de aluminio tendrá una eficiencia significativa para el aclaramiento del agua residual de la Cooperativa de servicios San Santiago - Acora.

### 1.3.2. Hipótesis específicas

- Las características fisicoquímicas finales serán mejores que las muestras iniciales tras el tratamiento conjunto con los coagulantes (*Opuntia ficus-*



- indica* y sulfato de aluminio) en aguas residuales de la Cooperativa de servicios San Santiago – Acora.
- El coagulante natural obtenido a partir de *Opuntia ficus-indica*, cuando se utiliza en combinación con sulfato de aluminio, la eficiencia del tratamiento será significativa.
  - La aplicación de la dosis del sulfato de aluminio/*Opuntia ficus-indica*, así como la velocidad de agitación y el pH adecuado, reducirá significativamente la turbidez del agua residual de la Cooperativa.

#### 1.4. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

La presente investigación es importante debido a que el tratamiento de aguas residuales industriales es un desafío creciente a nivel global, especialmente en sectores como la industria láctea, que genera grandes volúmenes de efluentes altamente contaminados.

Desde el punto de vista ambiental, la clarificación de aguas residuales reduce la cantidad de materia orgánica y nutrientes que llegan a los cuerpos receptores, protegiendo la vida acuática y los ecosistemas. La reutilización de aguas residuales clarificadas reduce la demanda de agua potable y de esta manera protege los recursos hídricos para futuras generaciones, así mismo la reducción de la contaminación del agua y la conservación de recursos hídricos contribuyen a mitigar los efectos del cambio climático. Además que puede generar conciencia sobre la importancia de la protección del medio ambiente y fomentar prácticas sostenibles en la industria láctea y, al mismo tiempo, mitigar los impactos negativos sobre el medio ambiente.

Este trabajo también tiene una importancia social, puesto que la mejora de la gestión de las aguas residuales en la industria láctea podría no solo beneficiar al medio



ambiente, sino también mejorar la calidad de vida de las comunidades locales, al preservar los recursos hídricos y reducir la contaminación. Además de que la reducción de la contaminación del agua y la conservación de recursos hídricos mejoran la calidad de vida de las comunidades y protegen su bienestar. La implementación de tecnologías de clarificación sostenibles puede generar empleo en la industria láctea y en la gestión de recursos hídricos.

En lo económico, el uso de recursos locales como la tuna podría fomentar el desarrollo de economías circulares, en las que se aprovechen los recursos naturales de manera eficiente y sostenible. En la región de Puno, donde dicha planta crece, el uso de la tuna podría reducir la dependencia de productos químicos importados, y disminuir los costos operativos en el tratamiento de las aguas residuales de las plantas procesadoras de lácteos. Además se necesita menor energía, pues el mucilago de *Opuntia ficus indica* puede coagular partículas más pequeñas, reduciendo la necesidad de energía para mezclar y agitar. Así mismo que requiere de una menor velocidad de mezcla, pues este coagulante puede acelerar el proceso de sedimentación, reduciendo el tiempo y la energía necesarios. La utilización de este coagulante natural puede reducir la cantidad de lodos generados, lo que ahorra costos en su manejo y disposición, pues al reducir la cantidad de lodos generados se reduce la necesidad de tratamiento de residuos antes de su eliminación y transporte de residuos a vertederos o sitios de eliminación.

Desde el punto de vista académico, este estudio contribuirá al avance del conocimiento sobre el uso combinado de coagulantes naturales y químicos en el tratamiento de aguas residuales en la industria láctea. En este contexto, las tecnologías de clarificación, como la coagulación-floculación, han demostrado ser efectivas. *Opuntia ficus-indica*, conocida como tuna, es una planta que ha despertado interés en la comunidad científica debido a sus propiedades coagulantes naturales, pues es un polímero natural



biodegradable y no tóxico que ha demostrado ser eficaz en la clarificación de aguas residuales. Sin embargo, su eficiencia puede ser mejorada mediante la combinación con otros coagulantes, como el sulfato de aluminio. Varios estudios han demostrado su capacidad para reducir la turbidez y eliminar sólidos suspendidos en aguas residuales, ofreciendo una alternativa sostenible y económicamente accesible. La investigación de la eficiencia de este coagulante natural *Opuntia ficus indica* contribuye al desarrollo de nuevas tecnologías de clarificación de aguas residuales y mejora la eficiencia de los métodos existentes, la eficiencia de un coagulante natural y biodegradable, contribuye a la comprensión de sus propiedades y aplicaciones.



## CAPÍTULO II

### REVISIÓN DE LITERATURA

#### 2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

##### 2.1.1. A nivel internacional

Gaibor (2014): El objetivo de su estudio fue realizar una evaluación de impacto ambiental de los efluentes generados por la planta de lácteos El Salinerito. Se analizaron los parámetros físicos y químicos de la calidad del agua, incluyendo la temperatura, el pH, la conductividad eléctrica, la turbiedad, el oxígeno disuelto, la demanda química de oxígeno (DQO) y la demanda biológica de oxígeno (DBO). El diseño de la planta de tratamiento se basó en la evaluación de los parámetros físicos y químicos de la calidad del agua y en la identificación de las tecnologías de tratamiento más adecuadas para abordar los problemas de contaminación identificados, siendo la turbidez inicial 674 NTU y un pH 4,80 (pp. 107-110).

Olivero et al. (2014): Indican que para la clarificación del agua utilizan productos químicos como el sulfato de aluminio, la finalidad de la investigación fue evaluar las propiedades que tendría la tuna *Opuntia ficus-indica* como coagulante y el alumbre en la clarificación de las aguas del río Magdalena en Magangué, Departamento de Bolívar (Colombia). Sus hallazgos demostraron que este coagulante natural es eficaz para clarificar aguas con baja turbidez. Además, se encontró que la velocidad de agitación durante el proceso de clarificación influye en la efectividad del coagulante, al lograr llegar hasta las partículas más dispersas acrecentando la validez del proceso de clarificación (p. 70).





González et al. (2015): Reportan que el objetivo de su investigación fue comparar la efectividad de *Opuntia ficus-indica* y *Opuntia wentiana* como coagulantes en la clarificación de aguas destinadas al consumo humano. La efectividad de estos coagulantes se demostró a través de la reducción de turbidez y color posteriormente de la sedimentación. Las pesquisas señalaron la efectividad de estas, siendo finalmente la turbidez de 82,98% con *Opuntia ficus-indica* y por arriba de 79,30% utilizando *O. wentiana*. En particular, la *Opuntia ficus-indica* demostró ser la más eficiente en la remoción de la turbidez, lo que la convierte en una alternativa prometedora para su estudio a gran escala (p. 81).

Contreras et al. (2015): En su investigación “El Nopal (*Opuntia ficus-indica*) como coagulante natural complementario en la clarificación de agua” el objetivo es la evaluación de la eficiencia del mucílago extraído del (*Opuntia ficus-indica*) como coagulante natural complementario al sulfato de aluminio, en el proceso de clarificación de agua proveniente del Rio Magdalena. Se empleo el método de la prueba de jarras, en donde se tuvo en cuenta los factores de velocidad de agitación, pH y proporción de los coagulantes; para la evaluación de la turbidez, pH, sólidos totales disueltos, conductividad eléctrica y color en el agua tratada. Con una velocidad de agitación de 200 rpm se obtuvo eficiencias de remoción de turbidez del 98% (p.41).

Parmar et al. (2011): En el estudio que realizaron, compararon bajo las mismas condiciones analíticas, la eficiencia del sulfato ferroso y el alumbre utilizados como coagulantes en el tratamiento químico de aguas residuales crudas recolectadas de plantas lácteas. Los resultados de la evaluación visual y fisicoquímica de las aguas residuales tratadas químicamente indicaron una mejora significativa de las características seleccionadas; sin embargo, se observó una



respuesta diferente al tratamiento con coagulante en las muestras analizadas. Las eficiencias de eliminación para parámetros individuales variaron en un amplio rango entre 20,9 y 97,2% (p. 14).

Chuiza et al. (2019), en su estudio: “Clarificación de un agua residual de una industria láctea mediante coagulación con Tuna (*Opuntia ficus indica*)”, realizado en Ecuador se investiga la clarificación del agua residual, para dicho estudio el coagulante natural utilizado es la *Opuntia ficus indica*. El método aplicado es la prueba de jarras, modificándose las variables como el volumen de coagulante y concentración de coagulante. La dosificación óptima fue 20 ml de solución de coagulante al 2%. Obteniéndose un 77,8% en turbidez (p. 20).

Tayawi et al. (2023): Examinan las desventajas y beneficios de los métodos convencionales empleados en el tratamiento de aguas residuales lácteas y exploran la utilización de la tecnología de membranas como una alternativa a estos enfoques. Además, analizan las últimas tecnologías implementadas para mitigar o aliviar las limitaciones de la tecnología de membranas (p. 2).

Vaca et al. (2014), en su estudio: “Aplicación de nopal (*Opuntia ficus indica*) como coagulante primario de aguas residuales” realizado en México, en este trabajo se evaluarón la efectividad del polvo seco de *Opuntia ficus indica* como coagulante primario en el tratamiento de aguas residuales, a través de pruebas de jarras. El agua residual utilizada fue de un sistema de drenaje. La velocidad de agitación fue de 150 rpm, obteniéndose la turbiedad del 92% (p. 211).



### 2.1.2. A nivel nacional

Según Miñano et al. (2018): En su investigación tuvieron como propósito hallar el potencial del floculante natural de *Opuntia ficus-indica* (tuna) para reducir la carga bacteriana en las aguas superficiales del distrito de Santa Rosa, Pallasca. Se utilizaron muestras de agua recolectadas de diferentes puntos de las acequias, y se aplicó una proporción de 350 ppm del floculante natural. Los resultados del análisis químico y microbiológico revelaron que el floculante natural logró reducir la carga bacteriana, pero no fue suficiente para eliminar completamente los coliformes totales y fecales. Por lo tanto, el agua tratada no es segura para consumo humano directo. Se recomienda realizar estudios adicionales para determinar la composición química y la estructura molecular del floculante natural, así como para evaluar su eficacia en diferentes condiciones de tratamiento (p. 1).

Según Córdova (2019) en su investigación tuvo como objetivo: Demostrar que a partir de la aplicación de sulfato de aluminio y tuna (*Opuntia ficus-indica*) se reducirá el nivel de contaminación de las aguas residuales. Se utilizaron diferentes concentraciones de mucilago del Tuna (20ml/l, 30ml/l y 40ml/l) en combinación con 40ml/l de sulfato de aluminio. Los tratamientos se realizaron mediante la prueba de jarras, lo que permitió evaluar la eficacia de la combinación de sustancias en la remoción de materia orgánica y turbidez. Los resultados mostraron que la combinación de sustancias logró remociones de materia orgánica que oscilaron entre 7,44% y 53,12%, siendo esta última la más eficiente. Además, se lograron remociones de turbidez que variaron entre 53,84% y 77,0% (p. 10).



Carhuamaca (2013) en su investigación da una alternativa solución al problema de contaminación ambiental, para ello se contó con las siguientes variables: Lactosa, Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), turbidez, acidez, pH y conductividad. Se evaluaron las variables de acidez y pH en un estudio que duró 10 días. Los resultados mostraron que no hubo diferencias significativas en la acidez y el pH entre los diferentes tratamientos. Sin embargo, se encontraron diferencias significativas en la reducción de lactosa y la turbidez. El tratamiento con 3% de mucílago de nopal (30 mL por litro de lactosuero) fue el más eficaz en la reducción de lactosa, con una reducción del 84,54%. En cuanto a la turbidez, el mismo tratamiento de 3% de mucílago de nopal también fue el más eficaz, con una reducción de 11,20 Unidades Nefelométricas de Turbidez (NTU). Además, se encontró que el tratamiento con 3% de mucílago de nopal también fue el más eficaz en la reducción de la acidez, con un valor de 0,270 g/L expresados como ácido láctico, y en la regulación del pH, con un valor de pH 4,96 (p. 12).

Camacho (2016) en su investigación tuvo como objetivo: Obtener la dosis óptima del Cladodio de Tuna en comparación del sulfato de aluminio para clarificar el agua de río Surco. Se realizó un análisis comparativo de la eficiencia del Cladodio de Tuna y el Sulfato de Aluminio como coagulantes para clarificar el agua del río Surco. Los resultados mostraron que la dosis óptima del Cladodio de Tuna es de 0,4 gr, lo que resultó en una eficiencia superior al 90%. En comparación, el Sulfato de Aluminio requirió una dosis de 0,3 gr para lograr una eficiencia similar. Sin embargo, el análisis de varianza (Anova) reveló que la dosis óptima del Cladodio de Tuna es significativamente más eficiente que la del Sulfato de Aluminio, con un valor de significancia de 0,00001 (p. 12).



Arrascue & Figueroa (2023) en su investigación: La finalidad fue determinar el efecto del mucílago del nopal y piedra de alumbre en la remoción de turbidez de las aguas del río Zaña, departamento de Lambayeque. Los resultados obtenidos antes de aplicar el tratamiento eran  $>1000$  UTN el cual está superando los ECA, para el procedimiento se usó 3 repeticiones con diferentes dosis en un tiempo determinado 30 minutos y su velocidad de agitación de 200 rpm, se aplicó la misma cantidad, el mucílago de nopal fue de 1g con 94,4 NTU de turbidez, su oxígeno disuelto con 5,20 y su pH de 7,33, la piedra de alumbre con una dosis de 1g removió 33,5 NTU de turbidez, el oxígeno disuelto fue de 2,40 y su pH 4,12. Al aplicar ambas sustancias, se encontró que la dosis efectiva de 0,5g logró una remoción de turbidez del 99,82%. Sin embargo, esta dosis no cumplió con los parámetros establecidos para el oxígeno disuelto y el pH. Por otro lado, la dosis de 1g logró una remoción de turbidez del 93,5% y, además, cumplió con los parámetros establecidos para el pH, según los Estándares de Calidad Ambiental (ECA). Finalmente, la dosis de 1,5g logró una remoción de turbidez del 99,71%, pero presentó un desequilibrio en el oxígeno disuelto y el pH. Esto sugiere que, aunque esta dosis es efectiva para remover la turbidez, puede tener un impacto negativo en la calidad del agua en otros aspectos (p. 9).

### **2.1.3. A nivel regional**

Quispe (2018) tuvo como objetivo: La evaluación de la capacidad coagulante de la semilla de Moringa oleífera como un coagulante natural en el tratamiento de lactosuero para disminuir DQO y SST en una planta quesera. Se utilizó el método de coagulación y floculación en la prueba de jarras, con un diseño factorial que consideró dos variables: el pH (10 y 11) y la concentración del coagulante (5% y 10%). La mayor remoción de DQO fue con una



concentración del 5% y un pH 11, alcanzando una remoción del 39,59%. De manera similar, la mayor remoción de SST se logró con una concentración del 5% y un pH de 10, alcanzando una remoción del 55,99%. Entonces se demostró que la semilla de Moringa oleífera tuvo una eficiencia muy alta para el tratamiento de lactosuero, logrando una remoción significativa de DQO (39,59%), SST (55,99%) y turbidez (73,27%) (p. 11).

## **2.2. MARCO TEÓRICO**

### **2.2.1. Aguas residuales industriales**

Proviene de actividades o negocios que utilice agua sean para sus procesos, tienen características muy diferentes a las aguas residuales municipales. Sus procesos y composición varían, y sus características también varían entre industrias y así como en una misma industria (Vielman, 2019). En ocasiones las industrias no emiten emisiones de una manera continua, sino sólo en determinados momentos en el día o a veces sólo en determinadas épocas del año. También son habituales las fluctuaciones de tráfico y carga a lo largo del día. Existen más contaminadas que las aguas residuales domésticas y la contaminación hace que su eliminación sea mucho más difícil. Su elevada carga, combinada con la gran variabilidad que poseen, dificulta el tratamiento de aguas residuales. No desarrollar una comprensión amplia de las aguas residuales industriales puede dar lugar a errores en generalizaciones o extrapolaciones al aplicar métodos diseñados para aguas residuales domésticas. Por tanto, cada situación requiere una investigación específica (Vielman, 2019).



### **2.2.2. Efluente de aguas residuales lácteas**

La generación de aguas residuales permitida en los lácteos es de  $3\text{m}^3$  de leche procesada. Casi el 2% de la leche manipulada en lechería se desperdicia. El efluente de aguas residuales es simple leche diluida y altamente biodegradable. La leche tiene grasas, proteínas, lactosa, minerales y sólidos totales que contribuyen al contenido orgánico (Chollangi & Hossain, 2007). El efluente lácteo generalmente tiene diluciones de productos lácteos provenientes del lavado de pisos, derrames de leche, efluente líquido de queso y suero de leche (Agrawal & Sarode, 2021).

### **2.2.3. Contaminación que causa efectos de las aguas residuales lácteas**

El agotamiento del oxígeno disuelto es el problema más importante asociado con los efluentes de la industria láctea. Cuando se vierte en estanques puede haber putrefacción debido a la formación de ácido láctico y ácido butírico por la rápida degradación de la lactosa, malos olores, grasa flotante, crecimiento de sustancias acuáticas (Agrawal & Sarode, 2021).

### **2.2.4. Vertido al alcantarillado**

El agua de alcantarillado se vuelve séptica solo en el alcantarillado y se puede requerir más tratamiento previo para la aireación en la planta de tratamiento de aguas residuales debido a la presencia de carbohidratos y alta temperatura de descarga. La atención no debe centrarse solo en el tratamiento, sino también en reducir el costo y la eficiencia del proceso de aumentar las ganancias (Wang et al., 2017).

### 2.2.5. Impactos ambientales de una planta quesera

La utilización de calderas genera emisiones atmosféricas de bajo impacto ambiental. Se utilizan para incrementar la temperatura del agua de lavado y para el calentamiento de los tanques de pasteurización de la leche, su funcionamiento es mediante procesos de combustión de carbón. Periódicamente las empresas se someten a un análisis de emisiones gaseosas que siempre deben mantenerse por debajo de los límites permisibles. Se tienen altos niveles de producción de residuos sólidos, pero con un impacto ambiental controlado. El elemento de mayor impacto ambiental es la generación de aguas residuales. Las principales fuentes de efluente líquido son los procesos de lavado, salado y coagulación. (Godoy, 2019). Ciertas plantas queseras las aguas generadas en el proceso de elaboración de quesos lo vierten en los suelos aledaños a la zona de producción, de esta manera también ocurre una contaminación de suelos como generación de malos olores y producción de gases que emanan la descomposición de estos residuos.

**Tabla 1**

*Impactos ambientales en la fabricación de quesos*

Actividad	Aspecto	Impacto
Generación de vapores	Emisiones al aire	Contaminación
Lavados y desinfección	Descargas de efluentes	Contaminación aguas
Desperdicios de producción	de Generación de residuos	de Acumulación de contaminantes (lactosuero)
Lavado y uso de energía	Cosumo recursos energía	y Degradación recursos

(Gamarra, 2018, p. 37)



### 2.2.6. Lactosueros

El lactosuero es un subproducto de la producción de queso que se obtiene cuando la leche se coagula. Se estima que por cada 10 litros de leche de vaca, se generan entre 8 y 9 kilogramos de lactosuero, lo que representa aproximadamente el 90% del volumen original de la leche (Carhuamaca, 2013). El suero es el líquido que se obtiene tras la separación de la fase de cuajada o micela en el proceso de elaboración del queso y la caseína. Sus características son líquido, de color amarillo verdoso, turbio, sabroso, ligeramente dulce, ácido, con contenido de nutrientes o extracto seco de 5,5% a 7%. El suero se define como "la sustancia líquida obtenida al separar la cuajada de la leche durante la elaboración del queso" (Carhuamaca, 2013).

#### Figura 1

*Obtención de lactosuero*



Nota: (Carhuamaca, 2013, p. 17)

**Tabla 2***Composición del lactosuero dulce y ácido*

Componente	Lactosuero dulce g/L	Lactosuero ácido g/L
Fosfatos	1,0 – 3,0	2,0 – 4,5
Calcio	0,4 – 0,6	1,2 – 1,6
Proteína	6,0 – 10,0	6,0 – 8,0
Grasa	0,5 – 7,0	0,4 – 6,0
Lactosa	46,0 – 52,0	44,0 – 46,0
pH	5,6 – 6,1	4,3 – 4,7
Lactatos	2,0	6,4
Cloruros	1,1	1,1
Sólidos totales	63,0 – 70,0	63,0 – 70

Nota: (Gamarra, 2018)

### 2.2.7. Propiedades fisicoquímicas del lactosuero

La composición del suero es variable y depende de la elaboración del queso que contiene una mezcla compleja de nutrientes y compuestos. En general, el suero del queso está compuesto por aproximadamente 4,9% de lactosa, 0,9% de proteína bruta, 6% de ceniza, 0,3% de grasa, 0,2% de ácido láctico y 93,1% de agua. En cuanto a su contenido de nitrógeno, se estima que alrededor del 70% del nitrógeno total proviene de las proteínas presentes en el suero. puede ser utilizado como ingrediente en la producción de alimentos y bebidas, que tienen un valor nutricional mayor que la caseína. Se compone de  $\beta$ -lactoglobulina,  $\alpha$ -lactoalbúmina, inmunoglobulinas, proteínas proteicas y enzimas naturales (Ramirez, 2023)



### **2.2.8. Formas de tratar las aguas residuales de lácteos**

Para reducir el efecto de las aguas residuales lácteas en el medio ambiente, es necesario adaptar algunas técnicas avanzadas. Los métodos de tratamiento disponibles para las aguas residuales lácteas son aeróbicos, anaeróbicos, flotación por aire disuelto, clarifloculadores, proceso de oxidación avanzada, proceso de lodos activados, biofiltro de arena, electrocoagulación. Entre los muchos métodos, métodos fisicoquímicos y biológicos se utilizan principalmente para tratar las aguas residuales de los lácteos (Mulla et al., 2015).

### **2.2.9. Tratamiento de aguas residuales**

El tratamiento adecuado de las aguas residuales industriales así como su posterior reutilización contribuye al uso sostenible del recurso hídrico y la restauración ambiental de las aguas públicas y las áreas marinas y sus ecosistemas (Díaz, 2014).

### **2.2.10. Tratamiento de aguas residuales lácteas**

El medio ambiente se ve afectado por todas las etapas de la industria láctea (Krishna et al., 2022), incluida la producción de productos lácteos, el envasado y almacenamiento de productos, y las operaciones efectivas de comercialización y distribución (Sar et al., 2022). Si estos niveles de aguas residuales lácteas no se tratan adecuadamente, pueden provocar diversos problemas de contaminación (Kushwaha et al., 2010). La industria láctea produce grandes cantidades de aguas residuales que contienen lactosa, proteínas, componentes iónicos y (en pequeñas cantidades) grasas (Mehrotra et al., 2016). Grandes cantidades de aguas residuales lácteas deben tratarse antes de ingresar al sistema de alcantarillado. Además, la industria láctea tiene un impacto significativo en la contaminación y la calidad del



agua. Por lo tanto, dado que se utilizan grandes cantidades de agua en el procesamiento de la leche y en la producción de productos relacionados con la leche, se requieren métodos apropiados de tratamiento de aguas residuales para un método de utilización eficaz (Vijay & Murthy, 2023). Una cantidad tan grande de agua ya no es útil porque contiene una alta concentración de contaminantes, lo que la hace inutilizable (Kaur, 2021). Se examinarán las ventajas y desventajas del tratamiento tradicional de aguas residuales lácteas, teniendo en cuenta los principios en los que se basan estos procedimientos, generando la necesidad de crear nuevas tecnologías e incorporarlas al tratamiento de aguas residuales lácteas.

### **2.2.11. Coagulación y floculación**

El color y turbiedad del agua se debe a la presencia de partículas de muy pequeño diámetro: los coloides. Su liquidación no puede basarse en la simple liquidación. De hecho, su velocidad de liquidación extremadamente bajo. El tiempo necesario para una caída libre de 1 m puede ser de varios años (Ayeche, 2012). El propósito del proceso de coagulación-floculación es hacer crecer partículas coloidales debido a la inestabilidad. Después de eso, las partículas suspendidas forman un flóculo mediante adsorción y agregación (Lorenzo, 2006). La formación de flóculos se verterá y luego se filtrará.

#### **2.2.11.1. Coagulación**

La coagulación es la desestabilización química de partículas coloidales que se obtiene añadiendo reactivos llamados coagulantes y aplicando energía de mezcla para neutralizar las fuerzas que separan las partículas coloidales. Asimismo, se dice que la eficiencia de los procesos



posteriores de purificación del agua depende significativamente del proceso de coagulación (López, 2018).

#### **a. Factores que influyen en la coagulación**

La optimización del proceso de coagulación requiere una comprensión profunda de los factores que lo influyen. Al analizar la interrelación entre estos factores, se puede determinar la cantidad ideal de coagulantes necesarios para agregar al agua, asegurando así un proceso eficiente. A continuación, se presentan los factores más relevantes que impactan en este proceso:

**Temperatura:** A una temperatura de 0 – 10 °C la remoción de turbidez no es eficiente en estas condiciones se estaría impidiendo el acercamiento de las partículas para su desestabilización, asimismo, la viscosidad del agua se incrementa y con ello el transporte de las partículas coloidales se anula, por lo cual, la agitación exterior del agua no es suficiente para conseguir la aglomeración de las partículas pequeñas; además, el rango de pH óptimo también disminuye (López, 2018). Sin embargo, a medida que la temperatura aumenta de 10°C a 40°C, la eficiencia en la eliminación de la turbidez también aumenta, gracias al mayor número de colisiones entre partículas.

**Dosis óptima:** La dosificación del coagulante tiene un impacto significativo en la turbiedad residual, y su influencia se refleja en las curvas de coagulación, que pueden ser clasificadas en cuatro zonas distintas:

**Zona1:** Dosis insuficiente, no se produce coagulación.

**Zona 2:** Aumento de dosis, aglutinación rápida de coloides.

**Zona 3:** Dosis excesiva, reestabilización de coloides con ciertos valores de pH.

**Zona 4:** Al aumentar aún más la dosis, hasta producir una supersaturación se produce de nuevo precipitación rápida y efecto de barrido, arrastrando en su descenso las partículas que conforman la turbiedad.

## Figura 2

### Zona de coagulación



Nota: ( López, 2018, p. 29)

**pH óptimo:** El pH es un factor que influye en la coagulación, la investigación muestra que el pH óptimo para la coagulación depende del tipo de agua: aguas coloreadas es un pH bajo (4-6) para una coagulación efectiva y para aguas turbias un pH moderado (6,5-8,5) para una coagulación óptima. Asimismo, se sabe que entre las sales férricas y las de aluminio, la primera son efectivas en un rango más amplio de pH ( López, 2018).

**Concentración óptima:** La simulación efectiva del proceso de coagulación requiere considerar la proporción mínima de coagulante



en relación con el volumen total de agua a tratar, ya que la cantidad de coagulante es significativamente menor que la cantidad de agua, lo que requiere suficiente turbulencia para asegurar la dispersión del coagulante a través de la masa de agua, lo que hace que el contacto sea más rápido y sencillo con el máximo número de partículas coloidales. Asimismo, soluciones muy diluidas pueden hidrolizarse antes de su uso y formar productos que afectan negativamente el proceso de coagulación (López, 2018).

**Alcalinidad:** La alcalinidad influye en la velocidad de reacción de los coagulantes, produciéndose reacciones lentas con baja alcalinidad (< 30 mg/L) e instantáneas con valores de alcalinidad superiores a 70 mg/L (López, 2018).

**Mezcla:** Entre los factores físicos que van a influir en el proceso de coagulación se encuentran: la intensidad de agitación, el tiempo de mezcla, el sistema de aplicación del coagulante, el punto de aplicación y el tipo de dispositivo de mezcla (López, 2018).

## b. Tipos de coagulantes

**Coagulantes químicos:** Los coagulantes tienen una amplia gama de aplicaciones, incluyendo, tratamiento de agua industrial y doméstica, eliminación de contaminantes (Metales pesados, aceites, grasas, etc).

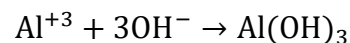
**Sulfato de aluminio ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18 \text{H}_2\text{O}$ ):** Es un coagulante versátil que puede emplearse solo o combinado con polímeros orgánicos para mejorar la floculación. Su eficiencia en la remoción de contaminantes alcanza del 90% al 99% en condiciones óptimas, y puede ser en forma



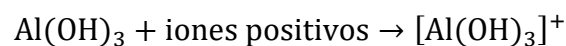
líquida o sólida, desafortunadamente, los humanos absorben fácilmente el aluminio, causando consecuencias negativas para la salud (Barrios, 2017).

**Reacciones generadas:** Al agregar sulfato de aluminio al agua, las moléculas se disocian en iones de aluminio ( $\text{Al}^{+3}$ ) y sulfato ( $(\text{SO}_4)^{-2}$ ). Luego, los iones de aluminio ( $\text{Al}^{+3}$ ) se combinan con los coloides negativos, neutralizando su carga y promoviendo la coagulación.

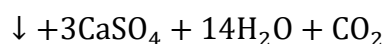
El  $\text{Al}^{+3}$  puede igualmente combinarse con los  $\text{OH}^-$  presentes en el agua dando lugar a la formación de hidróxido de aluminio.



El hidróxido de aluminio formado actúa como un centro de adsorción para cationes en solución. Esto forma una especie cargada positivamente, que neutraliza la carga negativa de los coloides y facilita la aglutinación de partículas.



Generalmente la solución de hidróxido de aluminio está en exceso, por lo que para su precipitación se aprovechan los iones sulfato y otros iones negativos que se encuentran en el agua (Jiménez & Medina, 2017)



Cuando el agua no presenta suficiente alcalinidad natural para reaccionar con el sulfato de aluminio, normalmente es necesario añadir cal.





**Coagulantes orgánicos:** Los coagulantes naturales, obtenidos de materiales renovables de origen vegetal y animal, son una opción sostenible y respetuosa con el medio ambiente para la clarificación y purificación del agua.

***Opuntia ficus-indica:*** Las cactáceas, una familia exclusiva del continente americano, han desarrollado una impresionante adaptabilidad a lo largo de millones de años, permitiéndoles prosperar en una amplia gama de climas, temperaturas y altitudes. Esta diversidad de condiciones ha dado lugar a una variedad sorprendente de formas, tamaños y texturas entre los cactus. Dentro del grupo de cactáceas, el género *Opuntia* destaca por su amplia representación, con un total de 258 especies reconocidas. Además de su presencia natural en América, el *Opuntia* también se cultiva en Italia, España y Sudáfrica. En Perú, el *Opuntia* se cultiva en varias regiones, incluyendo Lima, principalmente para satisfacer la demanda local y como hospedero de la “Cochinilla”. Sin embargo, sus usos trascienden la producción de colorantes, ya que también se emplea como alimento para humanos y ganado, así como en la elaboración de productos cosméticos. Es una planta que puede sobrevivir en temperaturas extremas y sequía, además tiene una gran capacidad para almacenar el agua gracias al contenido de mucílago en sus tejidos (Ceroni & Castro, 2013).

### Figura 3

*Opuntia Ficus -indica*



(Ceroni & Castro, 2013, p. 18)

#### c. Ensayo de la prueba de jarras

Esta prueba es la más representativa y determina el comportamiento del coagulante y simula las condiciones del proceso de coagulación en plantas de tratamiento de aguas residuales, determinando así el tipo y dosis del coagulante, el pH óptimo, el tiempo de mezclado y la velocidad que debe pasar. Por aquí, estimar la dosis óptima de coagulante necesaria para el tratamiento del agua.

#### d. Parámetros fisicoquímicos del agua

**pH:** El pH no tiene efectos directos sobre la salud, sin embargo, puede influir en los procesos de tratamiento del agua, como la coagulación y la desinfección (Metcalf & Eddy, 2003). Las aguas naturales suelen tener un pH entre 5 y 9. Cuando se trata aguas ácidas con pH bajo, se agrega un álcali (generalmente cal) para mejorar la coagulación. El pH óptimo para aguas crudas y tratadas es entre 5 y 9, lo que permite controlar el comportamiento de otros componentes del agua. En el



Reglamento de la Calidad de Agua para Consumo Humano, aprobado con Decreto Supremo N° 031-2010-SA de 24 de setiembre de 2010, se establece que el límite máximo permisible del pH en aguas para consumo humano se debe encontrar en el rango de 6,5 a 8,5 (López, 2018). **Temperatura:** La temperatura es un parámetro físico-químico crucial que se ve influenciado por condiciones ambientales. El agua a altas temperaturas permite la proliferación de microorganismos, repercutiendo en el sabor, color y olor de la misma (OMS, 2018)

**Turbidez:** La turbidez es causada por partículas en suspensión o coloides como arcilla, limo, suelo fino, etc., la turbiedad del agua se debe a la presencia de partículas que forman un sistema coloidal, es decir, un conjunto de partículas que se encuentran en suspensión en el agua y que no se sedimentan fácilmente. que reduce la transparencia del agua debido a la suspensión. Las mediciones de turbidez se realizan utilizando un nefelómetro o nefelómetro. Generalmente se utiliza la unidad nefelométrica de turbidez (NTU) (Metcalf & Eddy, 2003).

#### 2.2.11.2.Floculación

La floculación se refiere a la pérdida de partículas estables durante el proceso de coagulación. La agitación moderada del agua produce partículas de mayor tamaño y densidad que el agua, llamadas flóculos, que se sedimentan fácilmente. Los períodos de mezclado lento facilitan la floculación, permitiendo que los flóculos se peguen, ya que una mezcla vigorosa puede romperlos. Además, en los casos en que las floculaciones formadas como resultado de la aglomeración de varios coloides no sean lo



suficientemente grandes como para sedimentar, el proceso de floculación se puede mejorar agregando agentes de floculación o coadyuvantes de floculación, por lo tanto se forma un puente que conecta una superficie con otra, conectando partículas individuales con aglomerados (López, 2018).

#### **a. Factores que influyen la floculación**

**El tipo de agua a tratar:** La eficiencia de la floculación depende de las condiciones físico-químicas del agua, como pH, temperatura y turbiedad, así como de la alcalinidad presente. La interacción entre iones y partículas coloidales puede afectar la formación de flóculos y el tiempo requerido. Si el agua presenta alta turbiedad y un amplio rango de tamaño de partícula será más efectivo realizar este proceso (Jiménez & Medina, 2017).

**Tiempo y grado de agitación:** La existencia de distintas turbulencias durante la agitación, provoca que el coagulante añadido no se mezcle de manera uniforme en toda la masa de agua, lo que ocasiona a su vez la dificultad para que los flóculos se formen de manera más consistente en este proceso, por tanto la agitación debe ser uniforme para lograr una coagulación completa y obtener la reacción química para neutralizar las cargas (Jiménez & Medina, 2017).

**Tipo de dosis de floculante:** Con el fin de disminuir las dificultades en esta parte del proceso, se pueden usar algunas sustancias o productos que sirven como ayudantes de floculación, con lo cual se logra flóculos de mayor tamaño y de fácil sedimentación; entre los principales se tienen a: oxidantes, como la percloración, que es útil para oxidar la materia



orgánica presente; adsorbentes, como la arcilla, la caliza, sílice en polvo y el carbón activo, para aguas con alto valor de color (Jiménez & Medina, 2017).

La dosis de los diferentes auxiliares de la floculación también depende del tipo de agua que se tenga e influye en la eficiencia del mismo: al utilizar una cantidad mínima, no se cubre toda la masa de agua, resultando así en una alta turbiedad residual; del mismo modo ocurre si la cantidad añadida es excesiva, dando como resultado que no se aglutinen las partículas para formar flóculos de mayor tamaño, para este caso también se obtiene una turbiedad residual alta (Jiménez & Medina, 2017).

## CAPÍTULO III

### MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. LUGAR DEL ESTUDIO

El área de investigación se realizó en la Cooperativa de Servicios San Santiago de Acora, ubicada en la región de Puno. Esta planta procesadora de lácteos genera grandes volúmenes de aguas residuales, que serán el objeto de estudio.

**Tabla 3**

*Ubicación del punto de muestreo*

Ubicación	Coordenadas	Fecha	Hora
<b>Distrito:</b> Acora	E: 419936,69	17/06/2023	10:15
<b>Provincia:</b> Puno	N: 8229714,94		
<b>Departamento:</b> Puno			

Para la ejecución del tratamiento se ejecutó en el Laboratorio de Análisis Químico Ambiental “LAQUAMEQ E.I.R.L”. situado en el Jr. Deústua 522 – Juliaca -Puno – Perú.

**Figura 4**

*Ubicación del punto de muestreo*



Fuente: Google EARTH (2023)



### **3.2. TIPO DE INVESTIGACIÓN**

El tipo de investigación es aplicada ya que se tiene como objetivo resolver un problema específico, que es la clarificación de aguas residuales en una industria láctea. De enfoque cuantitativo por que se basa en la recopilación de datos numéricos sobre variables como la turbidez. Siendo el estudio de diseño experimental ya que se manipulará las variables independientes (concentración de coagulantes, velocidad de agitación y pH) para observar su efecto sobre las variables dependientes (turbidez) a través de experimentos controlados, siendo de carácter explicativo por lo que busca determinar y explicar cómo y porque la combinación de coagulantes naturales y químicos afecta la clarificación del agua.

### **3.3. POBLACIÓN**

La población del presente estudio está conformada por el agua residual generada en los procesos de producción láctea de la Cooperativa de Servicios San Santiago – Acora. Esta agua residual contiene una alta carga de sólidos suspendidos, grasas, proteínas y otros compuestos orgánicos, lo que la convierte en un efluente con características específicas que requieren tratamiento para su vertido.

### **3.4. MUESTRA**

La muestra de lactosueros fue puntual, se tomó directamente de la empresa quesera la Cooperativa de Servicios San Santiago de Acora considerando 40 L de muestra. El muestreo se llevó a cabo siguiendo las recomendaciones del “Protocolo de monitoreo de la calidad de los efluentes de las plantas de tratamiento de aguas residuales”. (OMA, 2013).

## Figura 5

### *Toma de muestra del efluente*



Para la toma de muestra inicialmente se consideró los parámetros de campo como la temperatura y el pH, seguidamente se realizó el etiquetado o rotulado de los frascos indicando la fecha y la hora de muestreo a la vez se tomó 20L de muestra para realizar el tratamiento. Una vez tomada la muestra, se almacenó en cooler con cubos de hielo para así mantener la temperatura de 4°C aproximadamente, y así evitar alteraciones en la composición química y biológica del agua. Para el ingreso de la muestra al laboratorio es requisito presentar la cadena custodia proveída por el laboratorio en donde se anotó los datos que corresponde como es la ubicación, fecha, hora, temperatura y pH. Siendo los datos más importantes para el registro de las muestras.

### **3.5. MATERIALES, EQUIPOS Y REACTIVOS**

#### **3.5.1. Materiales**

Matraces volumétricos de 1000, 500, 250 y 100 ml clase A; matraces Erlenmeyer de 2000, 1000, 500, 250 y 100 ml clase A; probetas de 1000, 500 y





100 ml; pipeta de 10ml; barra magnética; bombilla de succión, frasco lavador, espátula.

### 3.5.2. Equipos

- Multiparámetro (HACH HQ2200)
- Turbidímetro (EZODO)
- Termómetro de -5 a 100°C
- Test de jarras de 6 posiciones (BIRD)
- Balanza digital de precisión 0,0001g – 250g (ADAM)
- Tamiz

### 3.5.3. Reactivos

Coagulante natural (*Opuntia ficus – indica*), Sulfato de aluminio (MERCK), Cal, Solución tampón pH 7, agua desionizada o destilada.

## 3.6. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

### 3.6.1. Metodología para la determinación de las características fisicoquímicas del agua residual

Para determinar las características fisicoquímicas iniciales y finales luego del tratamiento, del agua residual de la Cooperativa de Servicios San Santiago – Acora, se realizó el muestreo del agua residual como se indica a continuación:

- Inicialmente, se procedió a obtener la muestra siguiendo los procedimientos detallados en el protocolo establecido.
- Se realizó la recolección de muestras en dos envases de polietileno de 500 mL, según las especificaciones para el análisis correspondiente.

- Se registraron datos de temperatura y pH en el lugar de recolección.
- Para mantener la calidad de la muestra, se utilizó una hielera con cubos de hielo, asegurando una temperatura de almacenamiento cercana a 4°C.
- Posteriormente, la muestra se trasladó a las instalaciones para su análisis y evaluación. de laboratorio para llevar a cabo su análisis correspondiente.

Los métodos de análisis fueron los siguientes:

#### **Tabla 4**

##### *Método de análisis*

<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Método</b>
Temperatura	°C	SM - 2550 B método de laboratorio de campo
Potencial de hidrógeno	Unid de pH	SM 4500 – H
Turbidez	NTU	SM - 2130 Método nefelométrico

Nota: (APHA, 2005) métodos de análisis de aguas residuales y potables.

Para realizar la caracterización antes y después del tratamiento de la muestra de agua residual de la industria láctea se analizó con los métodos estandarizados (APHA, 2005) como indica en la tabla 4.

#### **a) Determinación del pH por el método electrométrico y determinación de la temperatura por el método de campo**

Para el análisis del pH primeramente se realizó la calibración correspondiente sumergiendo el electrodo de pH en la solución tampón de pH 7,00 seguidamente se mantuvo en un electrolito de KCl para las próximas lecturas (APHA, 2005).

## Análisis de muestra

- Se tomo la muestra de lactosuero en un vaso precipitado de 500 mL.
- Seguidamente se sumerge el electrodo de pH en la muestra, esperar hasta que el equipo multiparámetro se estabilice.
- El equipo multiparámetro Hq220 nos da los valores de pH y de temperatura.
- Una vez obtenido los resultados se enjuaga el electrodo con agua destilada y se almacena en la solución de conservación (electrolito KCl).

### Figura 6

#### *Lectura de pH*



#### b) **Determinación de la turbidez**

Homogenizar la muestra agitando varias veces y medir la turbidez rápidamente para prevenir cambios de temperatura, floculación y sedimentación de partículas.

- Agítese la muestra.
- Espérese hasta que desaparezcan las burbujas de aire.
- Viértase la muestra en el vial del turbidímetro.
- Léase directamente la turbidez en la escala del aparato

## Figura 7

### *Determinación de la turbidez*



### c) **Análisis fisicoquímico final**

Tras el proceso de clarificación, se repetirán los análisis fisicoquímicos en las muestras tratadas, utilizando los mismos parámetros mencionados anteriormente. Se compararán los resultados para determinar la eficiencia del tratamiento.

### 3.6.2. **Metodología para obtener el coagulante natural y determinar la eficiencia de la remoción de la turbidez**

**Obtención del coagulante:** Para Definir y aplicar un proceso para obtener el coagulante natural a partir de la penca de Tuna y efectuar pruebas para determinar la efectividad del uso de coagulante natural conjuntamente con el sulfato de aluminio, para la clarificación del agua residual de la empresa láctea (Objetivo 2), para ello se tomó en cuenta el método propuesto en la literatura Chuiza et al. (2019)

**Preparación de muestra:** Las pencas de Tuna se recolectaron en la localidad San Cristóbal – Moquegua. Se seleccionaron las pencas maduras de *Opuntia*



*ficus – indica*, también conocidas como nopales o tunas. Seguidamente se realizó el lavado con agua potable para eliminar cualquier suciedad, polvo o residuos superficiales. El procedimiento que a continuación se detalla.

**Pelado y preparación:** Se retiró las espinas de las pencas de Tuna con el uso de guantes y una herramienta adecuada (cuchillo y pelador). Se retiró la capa exterior de la penca de Tuna para obtener la parte interna rica en mucílago, que es la sustancia con propiedades coagulantes.

**Extracción del mucílago (coagulante activo):** Se realizó el cortado de la pulpa en pequeños trozos. Se colocó los trozos en un recipiente con agua destilada y se dejó reposar durante 24 horas para que los compuestos activos se liberen en el agua.

**Concentración del mucílago:** Se extendió el mucílago en bandejas planas para secar. Seguidamente el secado se realizó en una estufa a 100 °C por 24 horas de tal manera que el secado sea de manera uniforme hasta convertirse en una capa sólida

**Pulverización del coagulante sólido:** Una vez obtenida el mucílago completamente seco y sólido, se rompió las piezas grandes en fragmentos más pequeños. Se tritura los fragmentos sólidos utilizando un mortero hasta obtener polvo

**Tamizado y almacenamiento:** Se tamizó el polvo obtenido para eliminar cualquier grumo y partículas grandes no deseadas. Se almacenó el coagulante sólido en recipientes herméticos en un lugar fresco y seco para preservar sus propiedades.

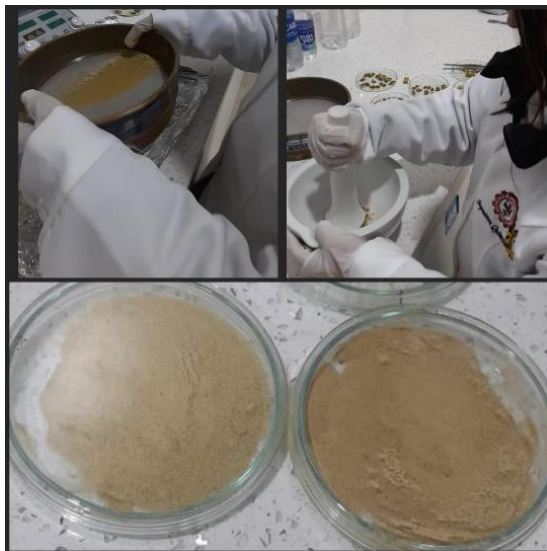
**Figura 8**

*Secado de Tuna (Opuntia ficus-indica)*



**Figura 9**

*Obtención del coagulante natural*



**a) Experimentos**

Se prepararon los coagulantes a utilizar el coagulante natural de *Opuntia ficus-indica* y Sulfato de aluminio en diferentes proporciones. El tratamiento se

realizó en la prueba de jarras para evaluar la efectividad de las combinaciones en la reducción de la turbidez del agua residual.

### **b) Aplicación en el tratamiento**

Las muestras de agua residual serán tratadas con las distintas combinaciones de coagulante natural y sulfato de aluminio. La clarificación del agua se llevará a cabo en condiciones controladas, y se evaluará el tiempo de sedimentación y la cantidad de lodo generado.

### **c) Evaluación de la efectividad**

Se medirán parámetros como la turbidez y la reducción de contaminantes antes y después del tratamiento con cada combinación de coagulantes. Los resultados se utilizarán para determinar la combinación más eficiente.

## **Figura 10**

*Tratamiento en la prueba de jarras*



Para el tratamiento se trabajó con 1 L de muestra de agua residual sometidas a una velocidad de mezcla rápida por 1 minuto a 100 rpm, 150 rpm y



200 rpm y posteriormente a una velocidad de mezcla lenta de 20 rpm por 20 minutos para finalmente sedimentarlos por 30 minutos.

### 3.6.3. Metodología para la determinación de las condiciones óptimas de remoción de turbidez

La determinación de la dosis del sulfato de aluminio/*Opuntia ficus-indica*, así como la velocidad de agitación y el pH adecuado para la remoción de turbidez del agua residual de la Cooperativa (Objetivo 3) se realizó a través de un diseño experimental.

#### a) Preparación de soluciones

Se prepara soluciones de *Opuntia ficus-indica* y sulfato de aluminio.

**Tabla 5**

*Dosis de coagulantes*

N°	<i>Opuntia ficus-indica</i> (mg/L)	Sulfato de aluminio (mg/L)
1	50	50
2	50	75
3	50	100

#### b) Modificación de pH

Para modificar el pH se utilizó cal (CaO) en vista que la muestra inicial obtuvo un pH ligeramente ácido utilizando 0,05g/L

#### c) Ensayos de clarificación





Se realizarán ensayos con muestras de agua residual de industria láctea utilizando las combinaciones de los coagulantes. Se medirá la turbidez antes y después del tratamiento para cada conjunto de condiciones experimentales.

#### d) Optimización de condiciones

Los datos obtenidos se analizarán para determinar las concentraciones óptimas de *Opuntia ficus-indica* y sulfato de aluminio, así como la velocidad de agitación y pH que maximicen la clarificación del agua.

##### 3.6.3.1. Diseño experimental

En este estudio se utilizó la Metodología de Superficie de Respuesta (MSR) para la optimización de la remoción de turbidez basado en el diseño de Box-Behnken. En el diseño experimental, se evaluaron la relación de sulfato de aluminio/*Opuntia ficus-indica* ( $x_1$ ), velocidad de mezcla rápida ( $x_2$ ) y pH ( $x_3$ ). La variable dependiente (respuesta) fue la remoción de turbidez (%*R*) del agua residual de la Cooperativa de servicios San Santiago, Acora – Puno. En la tabla 6 se presenta los rangos y los niveles de las variables experimentales.

Los niveles superiores e inferiores de las variables se establecieron mediante ensayos preliminares de coagulación-floculación realizadas en un equipo de prueba de jarras agregando simultáneamente el coagulante orgánico y el sulfato de aluminio (relación sulfato de aluminio/ *Opuntia ficus-indica* s indica: 50 mg/50 mg, 75 mg/50 mg y 100 mg/50 mg) a los recipientes con muestras de agua residual sometidas a una velocidad de mezcla rápida por 1 minuto y posteriormente a una velocidad de mezcla

lenta de 20 rpm por 20 minutos para finalmente sedimentarlos por 30 minutos.

**Tabla 6**

*Rangos y niveles correspondientes a las variables del diseño Box- Behnken*

Variable, unidad	Factores	Niveles		
	x	-1	0	+1
Relación sulfato de aluminio/ <i>Opuntia ficus-indica</i> , <i>Re</i>	x <sub>1</sub>	1	1,5	2
Velocidad de mezcla rápida, <i>v</i> (rpm)	x <sub>2</sub>	100	150	200
pH, <i>Ph</i>	x <sub>3</sub>	6	7	8

El diseño de Box-Behnken presenta 1 corrida central y 5 réplicas en el punto central haciendo un total de 17 experimentos. El diseño experimental detallado en función de las variables naturales y codificadas se presenta en la tabla 7.

Las variables del proceso coagulación-floculación se codificaron como -1, 0, +1 utilizando la siguiente ecuación:

$$x_i = \frac{(\text{valor de la variable } i) - (\text{su nivel superior} + \text{su nivel inferior}) / 2}{(\text{su nivel superior} - \text{su nivel inferior}) / 2} \quad (1)$$

Las ecuaciones para la codificación de las variables de estudio como la relación sulfato de aluminio/ *Opuntia ficus-indica* (*Re*), velocidad de mezcla rápida (*v*) y pH (*pH*) fueron las siguientes:



$$x_1 = \frac{Re-1,5}{0,5} \quad x_2 = \frac{v-150}{50} \quad x_3 = \frac{pH-7}{1} \quad (2)$$

**Tabla 7**

*Matriz del diseño experimental de Box-Behnken para 3 variables.*

N°	Valores naturales			Valores codificados			Y <sub>i</sub> (%R)
	sulfato de aluminio/ <i>Opuntia ficus-indica</i> (Re)	Velocidad de mezcla rápida (rpm) (v)	pH (pH)	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>3</sub>	
1	1	100	7	-1	-1	0	Y <sub>i</sub>
2	2	100	7	1	-1	0	Y <sub>ii</sub>
3	1	200	7	-1	1	0	.
4	2	200	7	1	1	0	.
5	1	150	6	-1	0	-1	.
6	2	150	6	1	0	-1	.
7	1	150	8	-1	0	1	.
8	2	150	8	1	0	1	.
9	1,5	100	6	0	-1	-1	.
10	1,5	200	6	0	1	-1	.
11	1,5	100	8	0	-1	1	.
12	1,5	200	8	0	1	1	.
13	1,5	150	7	0	0	0	.
14	1,5	150	7	0	0	0	.
15	1,5	150	7	0	0	0	.
16	1,5	150	7	0	0	0	Y <sub>n-1</sub>
17	1,5	150	7	0	0	0	Y <sub>n</sub>

La remoción de turbidez (% $R$ ) del agua residual de la Cooperativa de servicios San Santiago, Acora- Puno, se calculó mediante la siguiente formula:

$$\%R = \left( \frac{T_0 - T_f}{T_0} \right) \times 100 \quad (3)$$

Donde % $R$  es el porcentaje de remoción de turbidez,  $T_0$  y  $T_f$  es la turbiedad inicial del agua residual antes del tratamiento y después del tratamiento en NTU respectivamente.

#### a) Estimación del efecto de las variables

La estimación de los efectos de las variables se realizó utilizando el software Statgraphics Centurion XVI versión de prueba.

#### b) Ajuste a un modelo de regresión

El modelo de la ecuación polinomial de segundo orden para ajustar los datos experimentales del diseño de Box-Behnken fue la siguiente:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{j=2}^k \sum_{i=1}^{j-1} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (4)$$

Donde  $x_i$  son las variables independientes,  $Y$  es la variable respuesta,  $\beta_0$  es la constante del modelo,  $\beta_i$  son coeficientes lineales,  $\beta_{ij}$  son coeficientes de producto cruzado,  $\beta_{ii}$  son los coeficientes cuadráticos y  $\varepsilon$  el error observado en la respuesta. Para las 3 variables de estudio codificadas  $x_1, x_2, x_3$ ; la ecuación polinómica de segundo grado fue la siguiente:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 + \beta_{33} x_3^2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{13} x_1 x_3 + \beta_{23} x_2 x_3 + \varepsilon \quad (5)$$

Los coeficientes del modelo de regresión fueron calculados utilizando el software Design Expert 7 versión de prueba.

### c) Análisis de varianza

**Tabla 8**

*Análisis de varianza del modelo de regresión de segundo orden.*

Fuente	Suma de cuadrados (SC)	Grados de libertad (GL)	Cuadrado medio (CM)	F-valor	p-valor
Modelo	$SC_M$	9	$CM_M$	$CM_M / CM_R$	P(F > F-valor)
$x_1$	$SC_{x_1}$	$a-1$	$CM_{x_1}$	$CM_{x_1} / CM_R$	P(F > F-valor)
$x_2$	$SC_{x_2}$	$b-1$	$CM_{x_2}$	$CM_{x_2} / CM_R$	P(F > F-valor)
$x_3$	$SC_{x_3}$	$c-1$	$CM_{x_3}$	$CM_{x_3} / CM_R$	P(F > F-valor)
$x_1 x_2$	$SC_{x_1 x_2}$	$(a-1)(b-1)$	$CM_{x_1 x_2}$	$CM_{x_1 x_2} / CM_R$	P(F > F-valor)
$x_1 x_3$	$SC_{x_1 x_3}$	$(a-1)(c-1)$	$CM_{x_1 x_3}$	$CM_{x_1 x_3} / CM_R$	P(F > F-valor)
$x_2 x_3$	$SC_{x_2 x_3}$	$(b-1)(c-1)$	$CM_{x_2 x_3}$	$CM_{x_2 x_3} / CM_R$	P(F > F-valor)
$x_1^2$	$SC_{x_1^2}$	$(a-1)^2$	$CM_{x_1^2}$	$CM_{x_1^2} / CM_R$	P(F > F-valor)
$x_2^2$	$SC_{x_2^2}$	$(b-1)^2$	$CM_{x_2^2}$	$CM_{x_2^2} / CM_R$	P(F > F-valor)
$x_3^2$	$SC_{x_3^2}$	$(c-1)^2$	$CM_{x_3^2}$	$CM_{x_3^2} / CM_R$	P(F > F-valor)
Residual	$SC_R$	$N - 10$	$CM_R$		
Falta de ajuste	$SC_{FA}$	3	$CM_{FA}$	$CM_{FA} / CM_R$	P(F < F-valor)
Error puro	$SC_{EP}$	4	$CM_{EP}$		
Total	$SC_T$	$N - 1$			

*a, b, c son los niveles de las variables y N número total de experimentos.*

### d) Gráfico de superficie de respuesta y contorno

Para realizar el gráfico de superficie de respuesta y gráfico de contorno se utilizó el software estadístico Design-Expert 7 versión de prueba.

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1. RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN DEL AGUA RESIDUAL INICIAL Y FINAL

Los resultados obtenidos en la muestra inicial se presentaron de la siguiente manera:

**Tabla 9**

*Resultados iniciales*

Parámetro	Unidad	Resultado
Temperatura en laboratorio	°C	24,5
Potencial de hidrógeno	Unid. de pH	5,83
Turbidez	NTU	727,0

La temperatura obtenida es el resultado de los lactosueros que salen de los procesos de elaboración de quesos. Sin embargo, este valor es relevante ya que las temperaturas más altas pueden afectar la eficiencia del tratamiento de aguas residuales, específicamente en procesos de coagulación y floculación. Según López (2018) el valor encontrado es óptimo para el tratamiento, ya que se encuentra dentro del rango. La turbidez inicial es extremadamente alta, lo que confirma la presencia de sólidos en suspensión y partículas coloidales, características típicas de las aguas residuales lácteas. En la investigación realizada se obtuvo una turbidez inicial de 727 NTU y un pH de 5,83, lo que confirma la presencia de sólidos en suspensión y partículas coloidales, características típicas de las aguas residuales lácteas de acuerdo a Barrios (2017) los



sólidos pueden incluir restos de proteínas, grasas y otros compuestos orgánicos e inorgánicos que se generan durante el procesamiento de los productos lácteos. El potencial de hidrogeno (pH) registrado indica que el agua residual tiene una naturaleza ligeramente ácida, lo cual es común en los efluentes de la industria láctea debido a la presencia de ácidos grasos y otros compuestos derivados de los productos lácteos procesados. Ayeche (2012) indica que el pH podría influir en el proceso de coagulación, ya que algunos coagulantes naturales y químicos funcionan de manera más efectiva en rangos de pH neutros o ligeramente alcalinos. Chuiza et al. (2019), en su investigación encontró que la turbidez inicial del agua residual de una industria láctea era de 361 NTU, con un pH de 4,18. Por otro lado, Gaibor (2014) tuvo como resultado una turbidez inicial 674 NTU y un pH 4,80. En la presente investigación se encontró una turbidez inicial de 727 NTU y un pH de 5,83; por lo que se considera que los resultados hallados son cercanos a las obtenidas por Chuiza et al. (2019) y Gaibor (2014), ratificándose que el agua residual en la industria láctea es altamente turbia y ácida. Luego de aplicar el tratamiento con los coagulantes se obtuvo un pH de 7 y una turbidez final de 2,33 NTU como se observa en la table 13, mientras que Chuiza et al. (2019) tras aplicar un tratamiento solo con el coagulante natural penca de tuna obtuvo una turbidez final de 80 NTU y un pH de 5,32; cabe mencionar que este autor no tomo en consideración como variable manipulada el pH.

#### **4.2. RESULTADOS DE LA OBTENCIÓN DEL COAGULANTE NATURAL DE PENCA DE TUNA Y LA EFICIENCIA DE LA REMOCIÓN DE LA TURBIDEZ**

El coagulante natural de penca de tuna presentó las siguientes características como se muestra en la tabla 10.

**Tabla 10***Características del coagulante sólido*

<b>Coagulante</b>	<b>Estado</b>	<b>Color</b>	<b>pH</b>	<b>Humedad (%)</b>
<i>Opuntia ficus-indica</i>	Sólido	Amarillo claro	6,8	8

El coagulante obtenido presentó un color amarillo claro y una textura muy fina con un pH de 6,8. El contenido de humedad fue del 8. Para el tratamiento se preparó 3 dosis de coagulante natural y coagulante químico dosis aplicadas para 1 litro de agua residual como se menciona a continuación.

**Tabla 11***Dosis de coagulantes*

<b>Coagulante</b>	<b>Dosis (mg/L)</b>		
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
<i>Opuntia ficus-indica</i>	50	50	50
Sulfato de aluminio	50	75	100

El proceso desarrollado para obtener el coagulante natural a partir de la penca de *Opuntia ficus-indica* fue exitoso, y las pruebas experimentales demostraron que su combinación con sulfato de aluminio mejora notablemente la remoción de turbidez del agua residual. El uso de coagulantes naturales ha sido ampliamente estudiado como una alternativa ecológica y sustentable a los productos químicos convencionales. En este sentido, nuestros resultados coinciden con estudios que han reportado la eficacia de la *Opuntia ficus-indica* para el tratamiento de aguas residuales, dado su contenido de





mucílago, un compuesto altamente efectivo para atrapar y flocular partículas en suspensión.

Para realizar los experimentos se realizaron en la prueba de jarras como indica en la siguiente tabla.

**Tabla 12**

*Características de tratamiento en la prueba de jarras*

Agitación	Tiempo (min)	RPM
Rápida	1	100
		150
		200
Lenta	20	20
Sedimentación	30	-

La alta eficiencia del 99,68% respalda el uso de este coagulante natural. Sin embargo, observamos que la eficacia disminuye con una relación mayor de coagulantes, lo que puede deberse a una sobresaturación del sistema, como ha sido reportado en otros estudios. Córdova (2019) reportó que después de aplicar conjuntamente los coagulantes (sulfato de aluminio y *Opuntia ficus indica*) en agua residual, obtuvo como resultado una eficiencia de remoción de turbidez que va de 53,84% hasta 77,0%. Contreras et al. (2015), logró una remoción de turbidez de 98%, esto puede deberse a que se utilizó más cantidad del Sulfato de aluminio 90% y en menor cantidad el *Opuntia ficus-indica* 10%. Chuiza et al. (2019), con solo la aplicación del coagulante natural *Opuntia ficus-indica* obtuvo una remoción de turbidez del 77,84%.

**Tabla 13***Resultados de la turbidez y porcentaje de remoción*

N°	Opuntia ficus- indica/sulfato de aluminio	Velocidad de mezcla rápida	pH	Turbidez final (NTU)	Remoción de turbidez
	<i>Re</i>	<i>v</i> (rpm)	<i>pH</i>		%R
1	1	100	7,08	66,23	90,89
2	2	100	7,06	367,64	49,43
3	1	200	7,23	213,37	70,65
4	2	200	7,11	381,38	47,54
5	1	150	6,12	142,64	80,38
6	2	150	6,13	368,52	49,31
7	1	150	8,01	228,28	68,60
8	2	150	8,02	359,72	50,52
9	1,5	100	6,02	96,47	86,73
10	1,5	200	6,05	163,79	77,47
11	1,5	100	8,06	105,85	85,44
12	1,5	200	8,10	257,29	64,61
13	1,5	150	7,05	4,73	99,35
14	1,5	150	7,08	5,02	99,31
15	1,5	150	7,13	8,00	98,90
16	1,5	150	7,10	6,11	99,16
17	1,5	150	7,02	2,33	99,68

Por otro lado, Vaca et al. (2014) aplicando solo *Opuntia ficus-indica*, obtuvo una remoción de turbidez de 92%. En otra investigación Olivero et al. (2014) con solo la aplicación del *Opuntia ficus-indica*, se obtuvo una remoción del 83,7%. En las investigaciones antes mencionadas las pruebas para comprobar la efectividad del coagulante natural fueron realizadas por el método de test de jarras, método que también



fue utilizado en la presente investigación, en la que luego de variar experimentalmente la combinación de ambos coagulantes (sulfato de aluminio y *Opuntia ficus indica*) se obtuvo como resultado una alta eficiencia del 99,68%. Las investigaciones realizadas por Olivero et al. (2014), Vaca et al. (2014) y Chuiza et al. (2019) respaldan el uso de este coagulante natural debido a su efectividad mayor a 50% de remoción de turbidez. Por otra parte, Contreras et al. (2015) y Córdova (2019) respaldan la efectividad de la mezcla conjunta de coagulantes (sulfato de aluminio y *Opuntia ficus-indica*) pues también encontraron una alta efectividad de remoción de turbidez de aguas residuales turbias.

### **4.3. RESULTADOS DE LAS CONDICIONES ÓPTIMAS DE REMOCIÓN DE TURBIDEZ**

#### **4.3.1. Diseño experimental**

Los resultados de la remoción de turbidez según Metodología de Superficie de Respuesta (MSR) del agua residual de la Cooperativa de servicios San Santiago, Acora-Puno fueron calculados utilizando la ecuación (3). Las remociones de turbidez se reportan en la tabla 14. En la tabla 14, la mayor remoción de turbidez fue del 99,68% (2,33 NTU) con una relación de sulfato de aluminio/ *Opuntia ficus-indica* de aluminio de 1,5, velocidad de mezcla rápida de 150 rpm y pH=7 (Experimento 17). Podemos destacar que este resultado está por debajo de los Límites Máximos Permisibles de Parámetros de Calidad Organoléptica para la turbiedad (5 NTU) del establecido en el Reglamento de Calidad del Agua para Consumo Humano del D.S. N° 031-2010-SA. Por otro lado, se obtuvo una baja remoción de turbidez del 47,54% (381,38 NTU) con una relación de *Opuntia ficus-indica*/sulfato de aluminio de 2, velocidad de mezcla rápida de 200 rpm y pH 7 (Experimento 4).

**Tabla 14***Matriz del diseño de Box-Behnken y respuestas observadas.*

N°	Sulfato de aluminio/ <i>Opuntia ficus-indica</i>		Velocidad de mezcla rápida		pH		Remoción de turbidez %R
	x <sub>1</sub>	Re	x <sub>2</sub>	v (rpm)	x <sub>3</sub>	pH	
1	-1	1	-1	100	0	7	90,89
2	1	2	-1	100	0	7	49,43
3	-1	1	1	200	0	7	70,65
4	1	2	1	200	0	7	47,54
5	-1	1	0	150	-1	6	80,38
6	1	2	0	150	-1	6	49,31
7	-1	1	0	150	1	8	68,60
8	1	2	0	150	1	8	50,52
9	0	1,5	-1	100	-1	6	86,73
10	0	1,5	1	200	-1	6	77,47
11	0	1,5	-1	100	1	8	85,44
12	0	1,5	1	200	1	8	64,61
13	0	1,5	0	150	0	7	99,35
14	0	1,5	0	150	0	7	99,31
15	0	1,5	0	150	0	7	98,90
16	0	1,5	0	150	0	7	99,16
17	0	1,5	0	150	0	7	99,68

El diseño experimental Box-Behnken permitió identificar las condiciones óptimas para maximizar la remoción de turbidez. Se encontró que una relación de coagulante sulfato de aluminio/ *Opuntia ficus-indica* de 1,5 (75 mg/50 mg), una velocidad de mezcla rápida de 150 rpm y un pH de 7 eran los parámetros



más efectivos para reducir la turbidez a 2,33 NTU, cumpliendo con los límites permisibles para consumo humano. Estos resultados concuerdan con estudios previos que destacan la importancia de un equilibrio adecuado entre las concentraciones de coagulantes y las condiciones operativas para lograr una eficiencia óptima en la clarificación. Contreras et al. (2015), aplicando un 20% mucílago de nopal/80% alumbre con a una velocidad de agitación de 200 rpm y pH 7, logró menores niveles de turbidez obteniendo una remoción de turbidez de 98%, a partir de una turbidez inicial de agua residual de 97,67 NTU. Córdova (2019), aplicando una cantidad de 40ml/L de sulfato de aluminio y 30 ml/L de *Opuntia ficus-indica*, a partir de una turbidez inicial de agua residual de 85 NTU, obtuvo una remoción de 85,76%. En otra investigación Olivero et al. (2014) con solo la aplicación del *Opuntia ficus-indica* con 40 mg/L a una velocidad de 200 rpm, a partir de una turbidez inicial de 174 NTU, obtuvo una remoción del 83,7%. Por otro lado, Vaca et al. (2014) aplicando solo el uso del *Opuntia ficus-indica* con una concentración de 70mg/L y velocidad de 150 rpm, obtuvo una remoción de turbidez de 92%, a partir de una turbiedad inicial de 365 NTU. En la presente investigación con una relación de sulfato de aluminio/ *Opuntia ficus-indica* de 1,5; velocidad de 150 rpm y pH 7 se logró una remoción de turbidez al 99,68% a partir de una turbidez inicial de 727 NTU. Por lo que, los resultados obtenidos por Contreras et al. (2015) respaldan la óptima remoción de turbidez cuando se tiene un pH = 7. así como la efectividad de remoción al mezclarse sulfato de aluminio y *Opuntia ficus indica*. Por otro lado, este mismo autor tuvo una mayor remoción con 200 rpm mientras que en los resultados obtenidos en la presente investigación los resultados máximos de remoción se obtuvieron a una velocidad de agitación de 150 rpm. Es necesario resaltar también que los autores

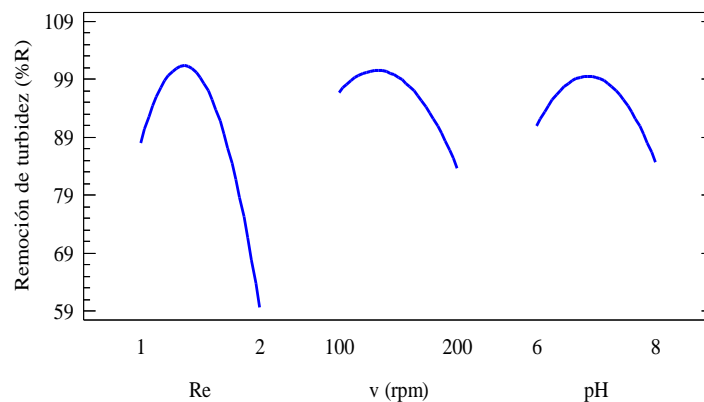
Contreras et al. (2015) y Córdova (2019) al aplicar de manera conjunta ambos coagulantes, para obtener un mayor porcentaje de remoción de la turbidez, utilizaron una mayor concentración de sulfato de aluminio con respecto a *Opuntia ficus indica* con resultados similares a los que se obtuvieron en la presente investigación.

#### 4.3.1.1. Efecto de las variables de estudio

En la figura 11 se muestra el efecto de las variables como la relación de sulfato de aluminio/ *Opuntia ficus-indica* (Re), velocidad de mezcla rápida ( $v$ ) y pH sobre la remoción de la turbidez.

#### Figura 11

Gráfico de efectos de las variables para la remoción de turbidez.

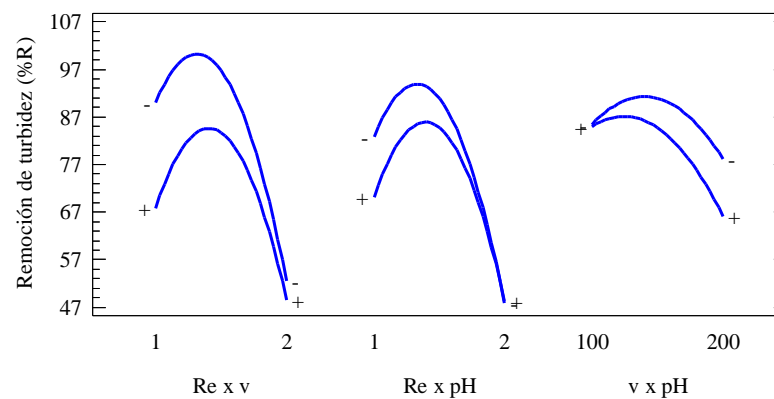


En la figura 11 En la figura 1 se observa que al utilizar una relación de sulfato de aluminio/*Opuntia ficus-indica* de 1 se obtiene una remoción de turbidez considerable mayor al 80% y si la relación de coagulantes es 2 disminuye la remoción de turbidez a 59%. Así mismo, si en lugar de utilizar una velocidad de mezcla rápida de 100 rpm se usa una velocidad de 200 rpm, la remoción de turbidez disminuye de 97% a 83%. También, si se emplea un pH de 6 se obtiene una remoción de turbidez del

91% y si se usa un pH de 8 la turbidez se reduce al 83%. En la figura 12 se muestra el gráfico de interacciones para las variables relación de sulfato de aluminio/ *Opuntia ficus-indica* (Re), velocidad de mezcla rápida (v) y pH.

**Figura 12**

*Gráfico de interacción de las para la remoción de turbidez*



Cuando existe interacción entre 2 variables sus líneas de respuesta no son paralelas, la ausencia de interacción entre 2 variables hace que las líneas de respuesta de los niveles de una variable sean paralelas cuando se grafica contra los niveles de la otra variable (Montgomery, 2004). En la figura 12 se visualiza que hay interacción entre las variables relación de sulfato de aluminio-velocidad de mezcla rápida, relación de sulfato de aluminio-pH y velocidad de mezcla rápida-pH. Es decir, el efecto de una variable depende del nivel en el que está otra de las variables.

#### 4.3.1.2. Modelo de regresión

Los coeficientes para las variables y sus interacciones del modelo de regresión de segundo orden (ecuación 5) para el diseño de Box-Behnken se presenta en la tabla 15.

**Tabla 15**

*Coefficientes de regresión del modelo ajustado para la remoción de turbidez.*

Coefficiente	Codificado	Natural
$\beta_0$	+99,28	-646,9838
$\beta_1$	-14,21	+204,6550
$\beta_2$	-6,53	+1,0967
$\beta_3$	-3,09	+157,8425
$\beta_{11}$	-25,51	-102,0250
$\beta_{22}$	-9,15	-0,0037
$\beta_{33}$	-11,57	-11,5713
$\beta_{12}$	+4,59	+0,1835
$\beta_{13}$	+3,25	+6,4950
$\beta_{23}$	-2,89	-0,0579

Reemplazando los coeficientes estimados en la ecuación (5), obtenemos el modelo de regresión para la remoción de turbidez del agua residual de la Cooperativa de servicios San Santiago, Acora-Puno en términos de sus variables codificadas fue:

$$Y = +99,28 - 14,21x_1 - 6,53x_2 - 3,09x_3 - 25,51x_1^2 - 9,15x_2^2 - 11,57x_3^2 + 4,59x_1x_2 + 3,25x_1x_3 - 2,89x_2x_3 \quad (6)$$

El modelo de regresión de segundo orden para la remoción de turbidez (%R) en términos de sus variables naturales es:

$$Y = -646,98 + 204,66Re + 1,10v + 157,84pH - 102,03Re^2 - 0,0037v^2 - 11,57pH^2 + 0,18Re v + 6,50Re pH - 0,06vpH$$

(7)



#### 4.3.1.3. Análisis de varianza

Se utilizó el análisis de varianza para evaluar el modelo de regresión de segundo orden para la remoción de turbidez (%R) (ecuación 7) del agua residual de la Cooperativa de servicios San Santiago, Acora-Puno. Las hipótesis a probar fueron las siguientes:

$$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_{11} = \beta_{22} = \beta_{33} = \beta_{12} = \beta_{13} = \beta_{23} = 0$$

$$H_1: \beta_i \neq \beta_{ii} \neq \beta_{ij} \neq 0 \text{ para al menos un } i, ii \text{ o } ij$$

Según la tabla 16 los valores observados para el modelo de regresión de segundo orden (%R) (F-valor = 121,26; p-valor < 0,05) demuestra que es estadísticamente significativo. Las variables de estudio para la remoción de turbidez como la relación de sulfato de aluminio/*Opuntia ficus-indica*, velocidad de mezcla rápida y pH fueron estadísticamente significativos (p-valor < 0,05). Así mismo, los términos interactivos relación de sulfato de aluminio/*Opuntia ficus-indica* - velocidad de mezcla rápida, relación de sulfato de aluminio/*Opuntia ficus-indica* de aluminio-pH y velocidad de mezcla rápida-pH son estadísticamente significativas (p-valor < 0,05). Además, los términos cuadráticos como sulfato de aluminio/*Opuntia ficus-indica*- sulfato de aluminio/*Opuntia ficus-indica*, velocidad de mezcla rápida-velocidad de mezcla rápida y pH-pH fueron también estadísticamente significativos (p-valor < 0,05). Por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula ( $H_0$ ) y se acepta la hipótesis alterna ( $H_1$ ).

**Tabla 16**

*Análisis de varianza del modelo de regresión de segundo orden para la remoción de turbidez*

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrado medio	F valor	p-valor
Modelo (%R)	6168,82	9	685,42	121,26	< 0,0001
Sulfato de aluminio / <i>Opuntia ficus-indica</i> ( <i>Re</i> )	1616,53	1	1616,53	285,97	< 0,0001
Velocidad de mezcla rápida ( <i>v</i> )	340,87	1	340,87	60,30	0,0001
Ph	76,38	1	76,38	13,51	0,0079
<i>Re x v</i>	84,18	1	84,18	14,89	0,0062
<i>Re x Ph</i>	42,19	1	42,19	7,46	0,0293
<i>v x Ph</i>	33,47	1	33,47	5,92	0,0452
<i>Re</i> <sup>2</sup>	2739,24	1	2739,24	484,59	< 0,0001
<i>v</i> <sup>2</sup>	352,23	1	352,23	62,31	< 0,0001
<i>pH</i> <sup>2</sup>	563,76	1	563,76	99,73	< 0,0001
Residual	39,57	7	5,65		
Falta de ajuste	39,24	3	13,08	161,20	0,0001
Error puro	0,32	4	0,081		
Total	6208,39	16			

$$R^2 = 99,36\% \quad R^2 \text{ (ajustado)} = 98,54\%$$

Por consiguiente, la mayoría de los regresores contribuyen de manera significativa al modelo de regresión con un nivel de significancia de 0,05. Además, se observa que el modelo representa adecuadamente el



proceso de clarificación del agua residual en una industria láctea empleando opuntia ficus-indica con sulfato de aluminio, situación que se confirma con el coeficiente de correlación ajustado,  $R^2$  (ajustado) = 98,54%. Contreras et al. (2015), en su estudio demostró que existe diferencias significativas ( $p$ -valor < 0,05) entre tratamientos para la eficiencia del proceso de clarificación el cual se midió en base a la disminución de los valores de turbidez iniciales.

Entonces el modelo matemático para la remoción de turbidez (%R) es:

$$\begin{aligned} \%R = & -646,98 + 204,66Re + 1,10v + 157,84pH - 102,3Re^2 \\ & - 0,0037v^2 - 11,57pH^2 + 0,18Re v + 6,50Re pH \\ & - 0,06v Ph \end{aligned}$$

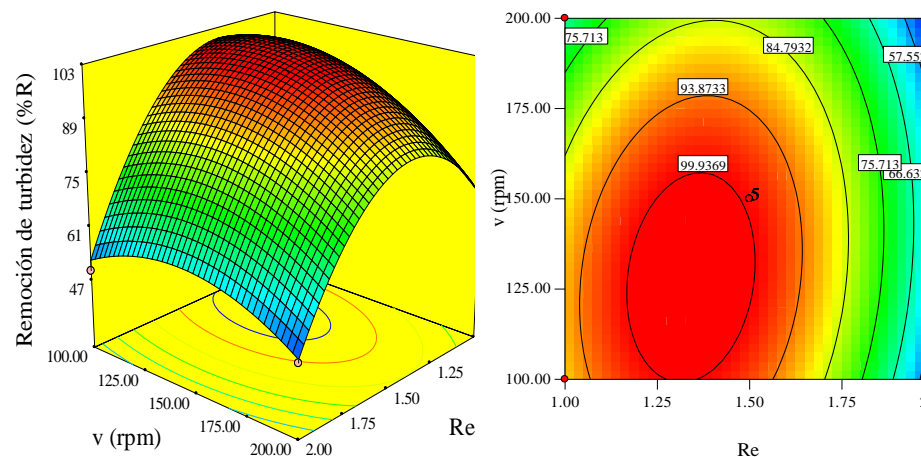
El análisis de varianza confirmó que las variables evaluadas tienen un impacto significativo en el proceso de clarificación. Las interacciones entre la relación de coagulantes, la velocidad de mezcla rápida y el pH resultaron ser estadísticamente significativas, lo que implica que el efecto de una variable depende del nivel de las otras. Esto es consistente con estudios sobre el uso de coagulantes naturales, que resaltan la complejidad del proceso de clarificación y la importancia de optimizar varios parámetros simultáneamente para obtener los mejores resultados. Finalmente, estos hallazgos son valiosos para la implementación a escala industrial, ya que permiten optimizar el proceso de clarificación, garantizando la reducción de la turbidez del agua residual de manera eficiente y sustentable.

#### 4.3.1.4. Superficie de respuesta y gráfico de contorno

En las figuras 13 a 15 se ilustran las superficies de respuesta y las gráficas de contorno de la ecuación (8) para la remoción de turbidez (%R) del agua residual de la Cooperativa de servicios San Santiago, Acora-Puno con turbidez inicial de las aguas de 727 NTU. Para lo cual se utilizó el software Design Expert 7, Anexo 4. En la figura 13 se ilustra los efectos de la relación de sulfato de aluminio/ *Opuntia ficus-indica* (Re) y velocidad de mezcla rápida para la remoción de turbidez a pH constante de 7. En la figura 14 se grafica los efectos de la relación de sulfato de aluminio/ *Opuntia ficus-indica* o (Re) y pH para la remoción de turbidez a velocidad de mezcla rápida constante de 150 rpm.

**Figura 13**

*Gráfica de superficie de respuesta y contorno para el efecto de la relación sulfato de aluminio/ Opuntia ficus-indica y velocidad de mezcla rápida para la remoción de turbidez.*

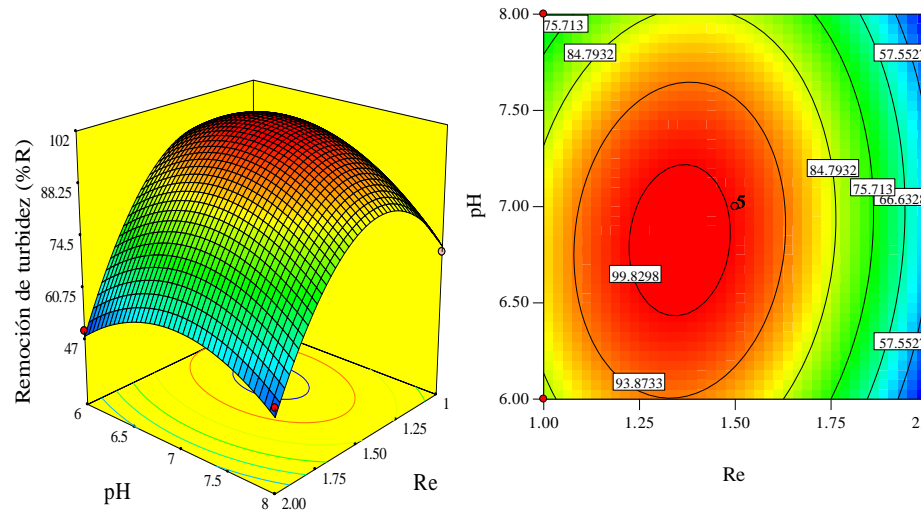


a) Superficie de respuesta

b) Gráfica de contorno

**Figura 14**

Gráfica de superficie de respuesta y contorno para el efecto de la relación de sulfato de aluminio/ *Opuntia ficus-indica* y pH para la remoción de turbidez.

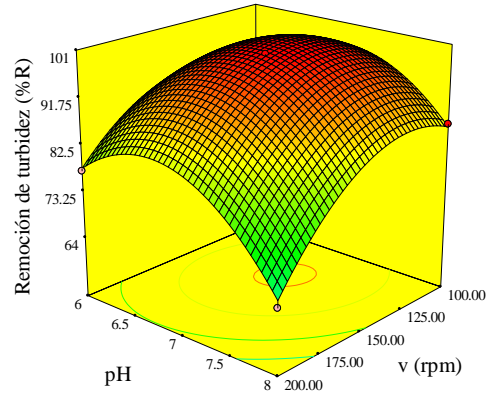


a) Superficie de respuesta  
b) Gráfica de contorno

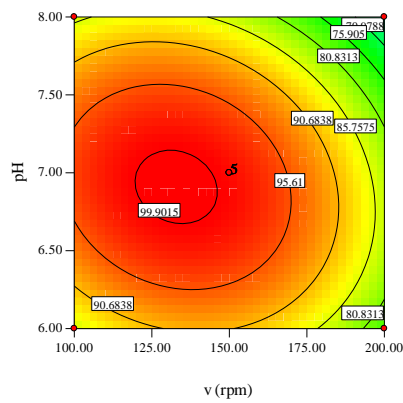
En la figura 15 se representa los efectos de la velocidad de mezcla rápida ( $v$ ) y pH a relación de sulfato de aluminio/ *Opuntia ficus-indica* constante de 1,5. Tras utilizar la relación de sulfato de aluminio/ *Opuntia ficus-indica* de 1,5, velocidad de mezcla rápida 150 y pH 7 resulto ser eficaz para la remoción de turbidez al 99,68%.

**Figura 15**

*Gráfica de superficie de respuesta y contorno para la velocidad de mezcla rápida y pH para la remoción de turbidez.*



a) Superficie de respuesta



b) Gráfica de contorno



## V. CONCLUSIONES

- El coagulante natural en combinación con sulfato de aluminio es altamente efectivo para la clarificación del agua residual de la Cooperativa de Servicios San Santiago – Acora, pues tras el tratamiento realizado se tuvo una eficiencia muy considerable de remoción de la turbidez, esto confirma la efectividad del tratamiento en la mejora de la calidad del agua residual de la industria láctea, permitiendo su posible reutilización o vertido según las normativas ambientales.
- A partir de la caracterización del agua residual, se determinó que la turbidez inicial era de 727 NTU, el pH de 5,83 y la temperatura de 24,5°C. Tras el tratamiento con *Opuntia ficus-indica* en combinación con sulfato de aluminio, se logró reducir la turbidez a 2,33 NTU, siendo inferior a los 5 NTU, con un pH 7, cumpliendo con los límites máximos permisibles establecidos en el Reglamento de Calidad del Agua para Consumo Humano.
- Se obtuvo el coagulante natural tras un proceso eficaz para la extracción del coagulante natural a partir de la penca de *Opuntia ficus-indica*. Las pruebas de clarificación realizadas con este coagulante natural en combinación con sulfato de aluminio demostraron una alta eficiencia en la remoción de turbidez, alcanzando un porcentaje máximo de remoción del 99,68%.
- Las condiciones óptimas para la remoción de turbidez fueron una relación de coagulante sulfato de aluminio/ *Opuntia ficus-indica* de 1,5, una velocidad de mezcla rápida de 150 rpm y un pH de 7. Bajo estas condiciones, se logró una remoción de turbidez del 99,68%.



## VI. RECOMENDACIONES

- Los resultados obtenidos en la combinación de *Opuntia ficus-indica* y sulfato de aluminio es efectiva para la remoción de turbidez del agua residual. Sin embargo, se recomienda realizar estudios adicionales para afinar las proporciones de estos coagulantes, especialmente en escenarios donde la variabilidad en las condiciones de operación, como el pH o la carga contaminante, pueda afectar la eficiencia del tratamiento. La implementación de un control de procesos más dinámico podría asegurar que la clarificación sea consistente en diversas condiciones operativas.
- Dado el éxito del proceso a nivel experimental, se sugiere implementar el tratamiento propuesto a escala industrial. Este paso requeriría la adaptación del sistema de clarificación a volúmenes más grandes de agua residual, así como el monitoreo continuo de parámetros críticos como el pH, la velocidad de agitación y la relación coagulante. Los ensayos piloto a mayor escala pueden validar la viabilidad del proceso y su sostenibilidad a largo plazo.
- Aunque los resultados de la remoción de turbidez fueron satisfactorios, es importante monitorear otros parámetros de calidad del agua para asegurar que el efluente tratado cumpla con todas las normativas ambientales vigentes. Parámetros como la demanda biológica de oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO) y la presencia de metales pesados deben ser evaluados a largo plazo para asegurar que el tratamiento también remueve otras impurezas y cumple con los estándares de vertido.





## VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agrawal, V., & Sarode, Dr. D. D. (2021). An overview on dairy industry wastewater and its Indian Scenario. *International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology*, 6(1), 363–368. <https://doi.org/10.33564/IJEAST.2021.v06i01.055>
- APHA, A. G. (2005). *Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales AHPA - AWWA - WPCF* (17.<sup>a</sup> ed.). Dias de Santos.
- Arrascue Cieza, M. L., & Figueroa Diaz, D. J. (2023). *Remoción de turbidez de las aguas del Río Zaña usando mucílago de nopal (Opuntia ficus-indica) y piedra de alumbre* [Tesis de pregrado, Universidad Cesar Vallejo]. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/138625>
- Ayeche, R. (2012). Treatment by Coagulation-Flocculation of Dairy Wastewater with the Residual Lime of National Algerian Industrial Gases Company (NIGC-Annaba). *Energy Procedia*, 18, 147-156. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.05.026>
- Bairagi, B., & Rastogi, D. (2015). Treatment of dairy wastewater by physiochemical method. *International Journal of Science and Research*, 6(4), 2134–2136. <https://www.ijsr.net/archive/v6i4/ART20172928.pdf>
- Barrios Huamán, J. (2017). *Uso del polvo de moringa oleífera Lam y sulfato de aluminio como coagulante en el tratamiento de aguas residuales de la industria alimentaria, urbanización Zárate – San Juan de Lurigancho 2017* [Tesis de pregrado, Universidad Cesar Vallejo]. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/28337>
- Camacho Villanueva, L. D. (2016). *Dosis óptima del Cladodio de Tuna, Opuntia ficus indica. L en comparación del Sulfato de Aluminio para clarificar el agua del río*



*Surco* – 2015 [Tesis de pregrado, Universidad César Vallejo].

<https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/4622>

Carhuamaca Vilchez, Z. (2013). *Estudio de la reducción del contenido de lactosa del lactosuero producido por las industrias lácteas utilizando mucílago nopal (Opuntia ficus indica)* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Centro del Peru]. <http://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/2668>

Ceroni, A. H., & Castro, V. (2013). *Manual de cactus identificación y origen* <https://repositoriodigital.minam.gob.pe/bitstream/handle/123456789/873/manual%2bde%2bcactus.compressed.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Chollangi, A., & Hossain, Md. M. (2007). Separation of proteins and lactose from dairy wastewater. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 46(5), 398-404. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2006.05.022>

Chuiza-Rojas, M. R, Hugo-Calderón, S. H., Vargas-Escobar, J. A. (2019). Clarificación de un agua residual de una industria láctea mediante coagulación con Tuna (*Opuntia ficus indica*). *Ciencia e ingeniería*. <https://www.redalyc.org/journal/5075/507567854003/>

Contreras-Lozano, K. P., Mendoza-Jairo, Y.A, Salcedo-Mendoza, G., Olivero-Verbel, R., & Mendoza-Ortega, G. P. (2015). El Nopal (*Opuntia ficus-indica*) como coagulante natural complementario en la clarificación de agua. *Producción + Limpia*. <http://revistas.unilasallista.edu.co/index.php/pl/article/view/773/526>

Córdova Merino, E. A. (2019). *Aplicación de sulfato de aluminio y tuna (Opuntia ficus-indica) para la remoción de materia orgánica y turbidez de las aguas residuales del camal municipal Tumán 2018* [Tesis de pregrado, Universidad César Vallejo].



[https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/38710/C%  
dova\\_MEA.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/38710/C%c3%b3rdova_MEA.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Custodio, M., Peñaloza, R., Espinoza, C., Espinoza, W., & Mezarina, J. (2022). Treatment of dairy industry wastewater using bacterial biomass isolated from eutrophic lake sediments for the production of agricultural water. *Bioresource Technology Reports*, 17, 100891. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2021.100891>

Díaz Claros, J. N. (2014). *Coagulantes-floculantes orgánicos e inorgánicos elaborados de plantas y del reciclaje de la chatarra, para el tratamiento de aguas contaminadas* [Tesis de maestría, Universidad Pedagógica Nacional Francisco Morazán]. <https://repositorio.upnfm.edu.hn/items/fbb5b1c2-59ac-40e9-a67b-d9ef248fd2d7>

Gamarra Ortiz, J. B. (2018). *Evaluación Del Impacto Ambiental Del Lactosuero Generado En La Línea De Producción De Quesos De La Planta De Lácteos Huacariz Alternativas De Mitigación Cajamarca—Perú—2016* [Tesis doctoral, Universidad Nacional de Cajamarca]. <http://repositorio.unc.edu.pe/handle/20.500.14074/2126>

Gaibor, J. A. (2014). Caracterización del agua residual generada en la planta de lácteos El Salinerito-Parroquia Salinas-Cantón Guaranda para el diseño de una planta de tratamiento. *Revista de Investigación Talentos*. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8551331>

Godoy Tapia, L. E. (2019). *Evaluación del impacto ambiental en la industria de derivados lácteos Tinajani EIRL 2019* [Tesis de pregrado, Universidad Continental].



[https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/6407/3/IV\\_FIN\\_108\\_TI\\_Godoy\\_Tapia\\_2019.pdf](https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/6407/3/IV_FIN_108_TI_Godoy_Tapia_2019.pdf)

González, Y., Fuentes, L., Mendoza, I., & Caldera, Y. (2015). Vista de *Opuntia ficus-indica* y *Opuntia wentiana*: estudio comparativo sobre su efectividad como coagulantes en la clarificación del agua. *Revista Tecnocientífica URU*, 81–89. <https://ojs.uru.edu/index.php/tecnocientificauru/article/view/gonzalezfuentesmendozaalderan9a15/pdfgonzalezfuentesmendozaalderan9a15>

Guibal, E., & Roussy, J. (2007). Coagulation and flocculation of dye-containing solutions using a biopolymer (Chitosan). *Reactive and Functional Polymers*, 67(1), 33–42. <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2006.08.008>

Jiménez Andrango, T.C., & Medina De la Torre, J. (2017). *Influencia de la dilución del sulfato de aluminio en la eficiencia de la coagulación en la potabilización del agua* [Tesis de pregrado, Escuela Politécnica Nacional]. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/18678>

Kaur, N. (2021). Different treatment techniques of dairy wastewater. *Groundwater for Sustainable Development*, 14, 100640. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2021.100640>

Krishna, R., Bhuvaneshwari, S., Majeed, F., Manoj, M., Jose, E., & Mohan, A. (2022). Different treatment methodologies and reactors employed for dairy effluent treatment—A review. *Journal of Water Process Engineering*, 46, 102622. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.102622>

Kushwaha, J. P., Srivastava, V. C., & Mall, I. D. (2010). Organics removal from dairy wastewater by electrochemical treatment and residue disposal. *Separation and*



*Purification Technology*, 76(2), 198-205.

<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2010.10.008>

Lorenzo-Acosta, Y. (2006). Estado del arte del tratamiento de aguas por coagulación -  
floculación. *ICIDCA*, 2, 10-17.

<https://www.redalyc.org/pdf/2231/223120664002.pdf>

López Pérez, M. (2018). *Evaluación del uso de la cactácea Opuntia ficus-indica como  
coagulante natural para el tratamiento de aguas* [Tesis de pregrado, Universidad  
Nacional Agraria La Molina].

<https://repositorio.lamolina.edu.pe/server/api/core/bitstreams/1dc7fe35-6cda-465e-b2c9-2004e635691c/content>

Mehrotra, R., & Mazumdar, S. K. (2016). Study on characterisation of Indian dairy  
wastewater. *International Journal of Engineering Applied Sciences and  
Technology*, 1(11), 77–88. <https://www.ijeast.com/papers/77-88,Tesma111,IJEAST.pdf>

Messaoudi, N., El Mouden, A., Fernine, Y., El Khomri, M., Bouich, A., Faska, N.,  
Çiğeroğlu, Z., Américo-Pinheiro, J. H. P., Jada, A., & Lacherai, A. (2023). Green  
synthesis of Ag<sub>2</sub>O nanoparticles using Punica granatum leaf extract for  
sulfamethoxazole antibiotic adsorption: Characterization, experimental study,  
modeling, and DFT calculation. *Environmental Science and Pollution Research*,  
30(34), 81352-81369. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-21554-7>

Metcalf & Eddy. (2003). *Wastewater Engineering treatment and reuse* (4.<sup>a</sup> ed.).

Mulla, R., Sutar, A., & Ranveer, A. (2015). Study of Various Technologies Available For  
Treatment of Dairy Wastewater- A Review. *International journal for research in*



*applied science and engineering technology (IJRASET)*, 3, 432–435.

[https://www.researchgate.net/publication/302899797\\_Study\\_of\\_Various\\_Technologies\\_Available\\_For\\_Treatment\\_of\\_Dairy\\_Wastewater-\\_A\\_Review](https://www.researchgate.net/publication/302899797_Study_of_Various_Technologies_Available_For_Treatment_of_Dairy_Wastewater-_A_Review)

Miñano-Calderón, B., Pacora-Bernal, L., Velásquez-Oyola, M., Guarniz-Flores, M., Enriquez-Valera, A., & Vásquez-Atalaya, P. (2018). Efecto del uso de floculante natural de *Opuntia ficus-indica* M. “tuna” en la disminución de la carga bacteriana de las aguas superficiales del distrito de Santa Rosa, Pallasca, Ancash. *Conocimiento para el desarrollo*, 3, 1-7.  
<https://revista.usanpedro.edu.pe/index.php/CPD/article/view/187>

Montgomery, D. C. (2004). *Design and analysis of experiments* (8a ed.).  
<https://industri.fatek.unpatti.ac.id/wp-content/uploads/2019/03/181-Design-and-Analysis-of-Experiments-Douglas-C.-Montgomery-Edisi-8-2013.pdf>

Olivero-Verbe, R.E., Aguas-Mendoza, Y. del R., Mercado-Martínez, I.D., Casas-Camargo, D.P., & Montes-Gazabón, L.E. (2014). Utilización de Tuna (*Opuntia ficus-indica*) como coagulante natural en la clarificación de aguas crudas. *Avances Investigación en Ingeniería*, 11(1), Article 1. <https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.1.302>

OMA, O. del medio A. (2013). *Protocolo de monitoreo de la calidad de los efluentes de las plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas o municipales*.  
<http://www3.vivienda.gob.pe/direcciones/Documentos/anexo-rm-273-2013-vivienda.pdf>

OMS, O. M. de la S. (2018). *Guías para la calidad del agua de consumo humano: Cuarta edición que incorpora la primera adenda* (4a ed + 1a adenda). Organización Mundial de la Salud. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/272403>



- Parmar, K., Prajapati, S., Patel, R., & Dabhi, Y. (2011). *Effective use of ferrous sulfate and alum as a coagulant in treatment of dairy industry wastewater*. 6(9). [https://www.researchgate.net/publication/266346264\\_Effective\\_use\\_of\\_ferrous\\_sulfate\\_and\\_alum\\_as\\_a\\_coagulant\\_in\\_treatment\\_of\\_dairy\\_industry\\_wastewater](https://www.researchgate.net/publication/266346264_Effective_use_of_ferrous_sulfate_and_alum_as_a_coagulant_in_treatment_of_dairy_industry_wastewater)
- Quispe Aroquipa, V. M. (2018). *Evaluación de la capacidad coagulante de la Moringa oleífera en la reducción de Demanda Química de Oxígeno y Sólidos Suspendidos Totales en lacto suero de la planta quesera Lacsur de la comunidad campesina de Posoconi, Región Puno, 2018* [Tesis de pregrado, Universidad Peruana Union]. <https://repositorio.upeu.edu.pe/server/api/core/bitstreams/86e06715-e8a6-4cfc-99bc-02aa12e6ca38/content>
- Ramirez Flores, K. A. (2023). *Aprovechamiento de efluentes de la industria láctea como solución nutritiva para sistemas hidropónicos en la microcuenca lecherea de Ayaviri-Puno* [Tesis de pregrado, Universidad Católica de Santa María]. <https://hdl.handle.net/20.500.12920/13280>
- Sar, T., Harirchi, S., Ramezani, M., Bulkan, G., Akbas, M. Y., Pandey, A., & Taherzadeh, M. J. (2022). Potential utilization of dairy industries by-products and wastes through microbial processes: A critical review. *Science of The Total Environment*, 810, 152253. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152253>
- Shete, B. S., & Shinkar, N. P. (2013). Dairy industry wastewater sources, characteristics & its effects on environment. *International Journal of Current Engineering and Technology*, 3, 1611–1615. <https://inpressco.com/wp-content/uploads/2013/11/Paper31611-1615.pdf>



- Tayawi, A.I., Sisay, E., Beszédes, S., & Kertész, S. (2023). Wastewater Treatment in the Dairy Industry from Classical Treatment to Promising Technologies: An Overview. *Processes*, *11*(7). <https://doi.org/10.3390/pr11072133>
- Tompe, A. S., & Wagh, C. H. (2017). A review on different methods of dairy wastewater treatment. *International Journal of Recent Research Aspects*, *4*, 443–445. <https://www.ijrra.net/Vol4issue4/IJRRRA-04-04-98.pdf>
- Vaca-Mier, M., López-Callejas, R., Flores-Rodríguez, J., Terres-Peña, H., Lizardi-Ramos, A., & Rojas-Valencia, N. (2014). Aplicación de nopal (*Opuntia ficus indica*) como coagulante primario de aguas residuales. *Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales. Investigación, desarrollo y práctica*, 210–216. <https://www.revistas.unam.mx/index.php/aidis/article/view/46815>
- Vielman Ramírez, R. E. (2019). *Determinación del pH óptimo de coagulación mediante los coagulantes sulfato de aluminio y sulfato ferroso de las agujas residuales de una industria de alimentos* [Tesis de pregrado, Universidad de San Carlos de Guatemala]. <http://www.repositorio.usac.edu.gt/13788/1/Rony%20Estuardo%20Vielman%20Ram%C3%ADrez.pdf>
- Vijay-Sonawane, A., & Murthy, Z. V. (2023). Dairy industry wastewater treatment by MOF and 2D nanomaterial engineered PVDF membranes based aerobic MBR: Membrane fouling mitigation and stability study. *Process Safety and Environmental Protection*, *171*, 680-693. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.01.062>





Wang, Y.-N., Wang, R., Li, W., & Tang, C. Y. (2017). Whey recovery using forward osmosis – Evaluating the factors limiting the flux performance. *Journal of Membrane Science*, 533, 179-189. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2017.03.047>



## ANEXOS

**ANEXO 1.** Turbiedad final de las muestras de agua residual de la Cooperativa de servicios San Santiago, Acora-Puno

N°	<i>Opuntia ficus-indica</i> /sulfato de aluminio	Velocidad de mezcla rápida	pH	Turbidez final (T <sub>f</sub> ) (NTU)
	<i>Re</i>	$\nu$ (rpm)	<i>pH</i>	
1	1	100	7,08	66,23
2	2	100	7,06	367,64
3	1	200	7,23	213,37
4	2	200	7,11	381,38
5	1	150	6,12	142,64
6	2	150	6,13	368,52
7	1	150	8,01	228,28
8	2	150	8,02	359,72
9	1,5	100	6,02	96,47
10	1,5	200	6,05	163,79
11	1,5	100	8,06	105,85
12	1,5	200	8,10	257,29
13	1,5	150	7,05	4,73
14	1,5	150	7,08	5,02
15	1,5	150	7,13	8,00
16	1,5	150	7,10	6,11
17	1,5	150	7,02	2,33



## ANEXO 2. Informe de resultados



### LAQUAMEQ E.I.R.L. LABORATORIO DE ANÁLISIS QUÍMICO AMBIENTAL

#### INFORME DE RESULTADOS N°: LQ - 06324A

##### DATOS DEL SERVICIO

Solicitante : Amelia Huarahuara Ramos

Proyecto : EFICIENCIA DEL OPUNTIA FICUS-INDICA CON SULFATO DE ALUMINIO  
PARA LA CLARIFICACIÓN DEL AGUA RESIDUAL EN UNA INDUSTRIA  
LÁCTEA DE LA REGIÓN DE PUNO

##### DATOS DEL SERVICIO

Producto : Agua  
Numero de muestras : 01  
Fecha de análisis : 18/06/2024  
Muestreado por : El cliente

##### Ubicación, fecha y hora de muestreo:

Código	Dist. /Prov./ Depart.	Ubicación	Fecha y hora de muestreo
M - Inicial	Acora /Puno/Puno	E: 419936.69 N: 8229714.94	17/06/2024 10:15

##### METODO DE ENSAYO

PARAMETRO	UNIDAD	METODO
Temperatura	°C	SM - 2550 B Método de laboratorio de campo
Potencial de hidrogeno	Unid. de pH	SM 4500 - H
Turbidez	NTU	SM - 2130 Método nefelométrico





**LAQUAMEQ E.I.R.L.**  
LABORATORIO DE ANÁLISIS QUÍMICO AMBIENTAL


**DATOS DEL RESULTADO**

N°	PARAMETRO	UNIDAD	RESULTADO
1	Temperatura en laboratorio	°C	24.5
2	Potencial de hidrogeno	Unid. de pH	5.83
3	Turbidez	NTU	727.0

**OBSERVACIÓN**

El presente informe de resultados es válido exclusivamente para la muestra que ha sido analizada.

**FECHA DE EMISIÓN DEL INFORME:** 04/07/2024

  
**LAQUAMEQ E.I.R.L.**  
LABORATORIO Y EQUIPOS  
**Ing. Karen Kelly Quispe Quispe**  
CIP. 194084  
GERENTE



**LAQUAMEQ E.I.R.L.**  
LABORATORIO DE ANÁLISIS QUÍMICO AMBIENTAL

**INFORME DE RESULTADOS N°: LQ - 06324B**

**DATOS DEL SERVICIO**

Solicitante : Amelia Huarahua Ramos

Proyecto : EFICIENCIA DEL OPUNTIA FICUS-INDICA CON SULFATO DE ALUMINIO  
PARA LA CLARIFICACIÓN DEL AGUA RESIDUAL EN UNA INDUSTRIA  
LÁCTEA DE LA REGIÓN DE PUNO

**DATOS DEL SERVICIO**

Producto : Agua  
Numero de muestras : 17  
Fecha de análisis : 27/06/2024  
Muestreado por : El cliente

**Ubicación, fecha y hora de muestreo:**

Código	Dist. /Prov./ Depart.	Ubicación	Fecha y hora de muestreo
T1 - T17	Juliaca /San Roman/Puno	E: 379428.932 N: 8285463.787	27/06/2024 10:15

**METODO DE ENSAYO**

PARAMETRO	UNIDAD	MÉTODO
Temperatura	°C	SM - 2550 B Método de laboratorio de campo
Potencial de hidrogeno	Unid. de pH	SM 4500 - H
Turbidez	NTU	SM - 2130 Método nefelométrico



Jr. Deústua N° 522 Barrio 28 de Julio. Puno - San Román - Juliaca  
www.laquameq.com - Cel. 920869679 - 979265920



**LAQUAMEQ E.I.R.L.**  
LABORATORIO DE ANÁLISIS QUÍMICO AMBIENTAL

**DATOS DEL RESULTADO**

CODIGO	TEMPERATURA EN LABORATORIO (°C)	pH	TURBIDEZ (NTU)
T - 1	14.2	7.08	66.23
T - 2	14.1	7.06	367.64
T - 3	14.3	7.23	213.37
T - 4	14.4	7.11	381.38
T - 5	14.3	6.12	142.64
T - 6	14.2	6.13	368.52
T - 7	14.2	8.01	228.28
T - 8	14.1	8.02	359.72
T - 9	14.2	6.02	96.47
T - 10	14.3	6.05	163.79
T - 11	14.5	8.06	105.85
T - 12	14.6	8.10	257.29
T - 13	14.4	7.05	4.73
T - 14	14.3	7.08	5.02
T - 15	14.4	7.13	8.00
T - 16	14.4	7.10	6.11
T - 17	14.5	7.02	2.33

**OBSERVACIÓN**

El presente informe de resultados es válido exclusivamente para la muestra que ha sido analizada.

FECHA DE EMISIÓN DEL INFORME: 04/07/2024

**LAQUAMEQ E.I.R.L.**  
LABORATORIO Y EQUIPOS  
Ing. Karey Kelly Quispe Quispe  
CIP. 194684  
GERENTE

Jr. Deústua N° 522 Barrio 28 de Julio. Puno – San Román – Juliaca  
www.laquameq.com – Cel. 920869679 - 979265920



# LAQUAMEQ E.I.R.L.

## LABORATORIO DE ANÁLISIS QUÍMICO AMBIENTAL

INFORME DE RESULTADOS N°: LQ 015-2024

### DATOS DEL SERVICIO

Solicitante: Amelia Huarahuara Ramos

Proyecto : EFICIENCIA DEL OPUNTIA FICUS-INDICA CON SULFATO DE ALUMINIO PARA LA CLARIFICACIÓN DEL AGUA RESIDUAL EN UNA INDUSTRIA LÁCTEA DE LA REGIÓN DE PUNO

### DATOS DEL ENSAYO

Producto : Coagulante natural - Sólido

Motivo : Análisis Físico - Químico

Ubicación, fecha y hora de muestreo:

Código	Dist. /Prov./ Depart.	Fecha y hora de muestreo
OFI	San Cristóbal/Mariscal Nieto/Moquegua	03/06/2024 12:00

\*OFI: *Opuntia ficus-indica*

### MÉTODO DEL ENSAYO

PARÁMETRO	UNIDAD	MÉTODO
Potencial de hidrogeno	Unid. de pH	SM 4500 - H
Humedad	%	Gravimétrico
Color	-	Observación

### DATOS DEL RESULTADO

PARAMETRO	UNIDAD	RESULTADO
Potencial de hidrogeno	Unid. de pH	6.8
Humedad	%	8
Color	-	Amarillo claro

FECHA DE EMISIÓN DEL INFORME: 04/07/2024

LAQUAMEQ E.I.R.L.  
LABORATORIO Y EQUIPOS  
*Karey Kelly Quispe Quispe*  
Ing. Karey Kelly Quispe Quispe  
CIP. 194084  
GERENTE

Jr. Deústua N° 522 Urb. 28 de Julio. Puno – San Román – Juliaca  
[www.laquameq.com](http://www.laquameq.com) – Cel. 979265920

### ANEXO 3. Evidencias fotográficas

#### Figura 16

*Ubicación del punto de muestreo*



#### Figura 17

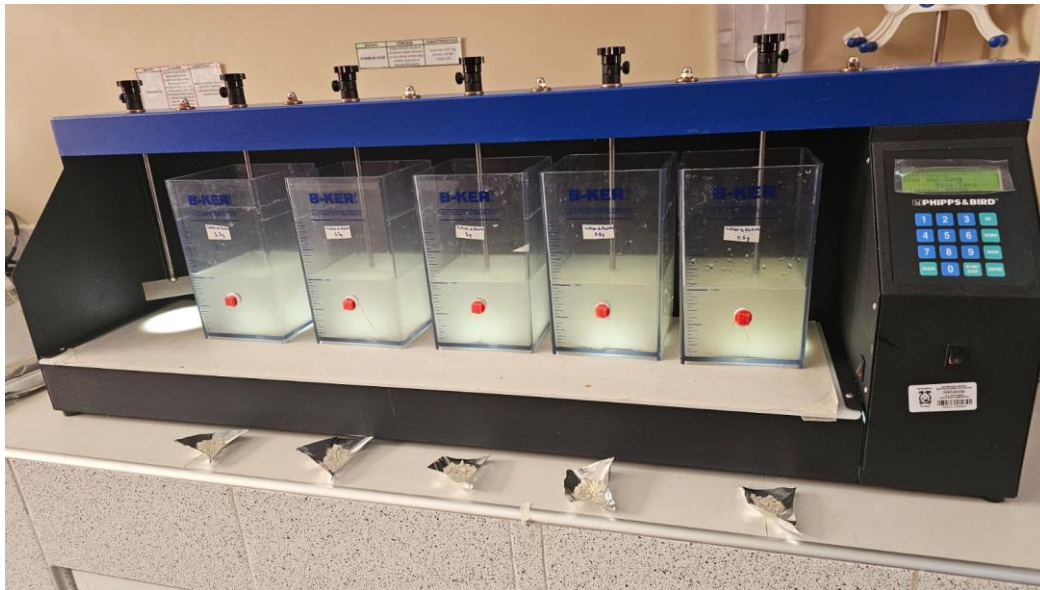
*Toma de muestra*





**Figura 18**

*Tratamiento el Test de Jarras*



**Figura 19**

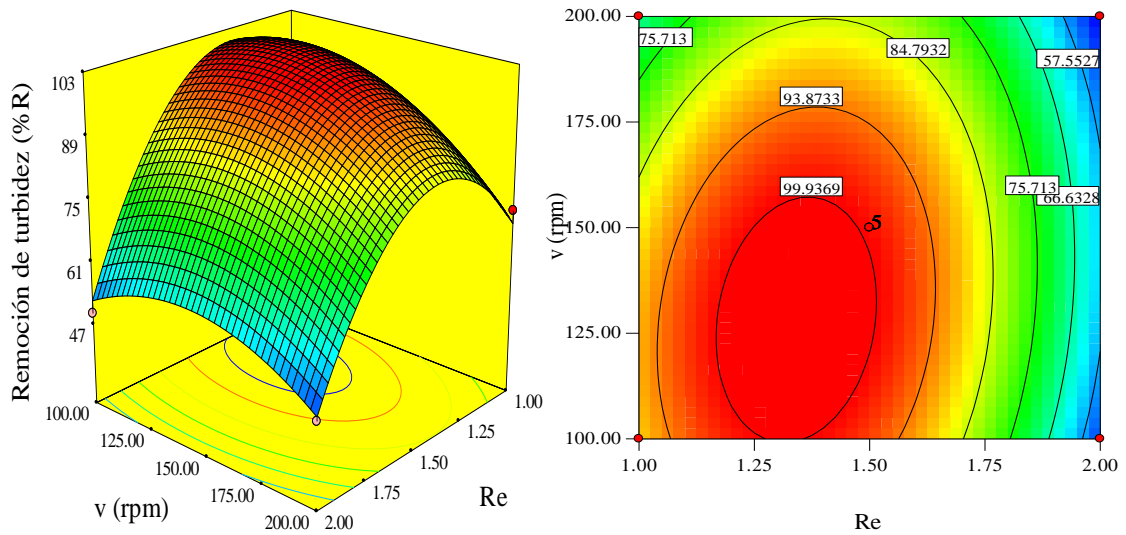
*Comparación de turbidez inicial frente al tratamiento*



#### ANEXO 4. Gráficas de superficie de respuesta y contorno

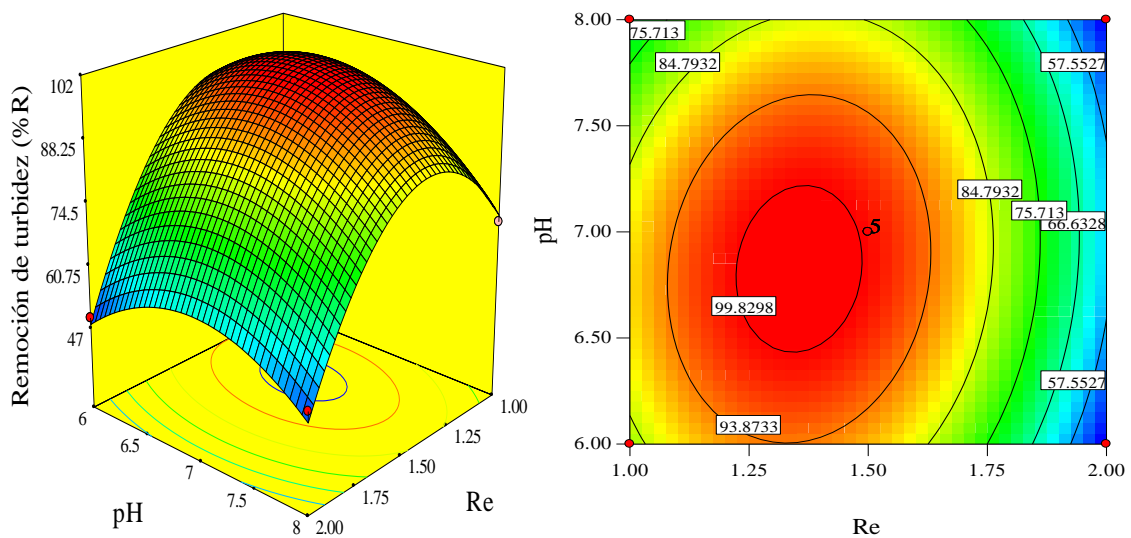
**Figura 20**

Gráfico de superficie de respuesta y contorno para el efecto de la relación de sulfato de aluminio/*Opuntia ficus-indica* y mezcla rápida para la remoción de turbidez



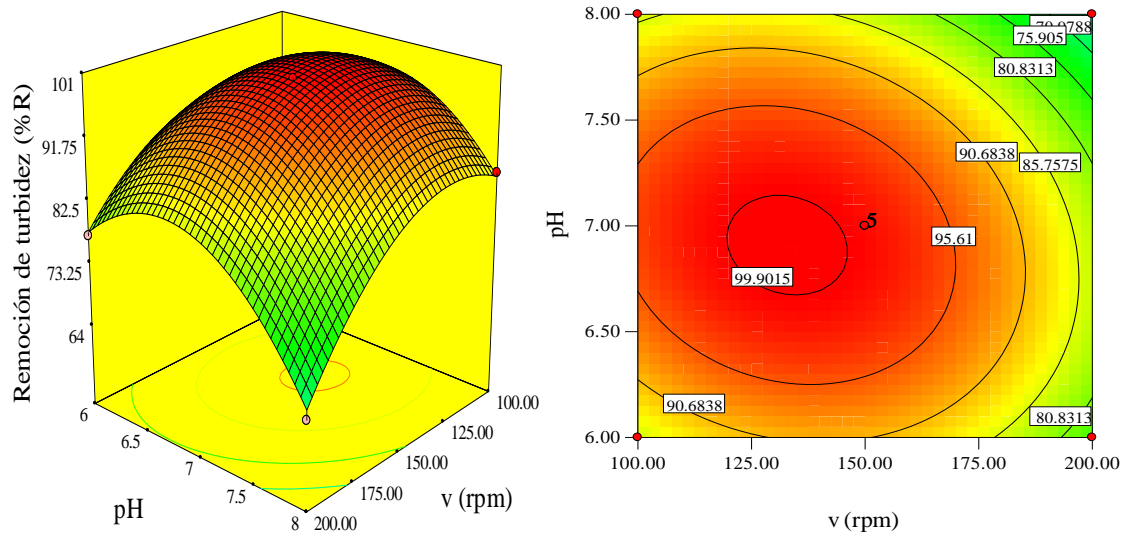
**Figura 21**

Gráfico de superficie de respuesta y contorno para el efecto de la relación de sulfato de aluminio/*Opuntia ficus-indica* y pH para la remoción de turbidez



**Figura 22**

*Gráfico de superficie de respuesta y contorno para la velocidad de mezcla rápida y pH para la remoción de turbidez*





## ANEXO 5. Declaración jurada de autenticidad de tesis



Universidad Nacional  
del Altiplano Puno



Vicerrectorado  
de Investigación



Repositorio  
Institucional

### DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD DE TESIS

Por el presente documento, Yo Amelia Huarahua Ramos,  
identificado con DNI 77043983 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional,  Programa de Segunda Especialidad,  Programa de Maestría o Doctorado

Ingeniería Química

informo que he elaborado el/la  Tesis o  Trabajo de Investigación denominada:

"Eficiencia del *Opuntia ficus-indica* con sulfato de aluminio para la  
clarificación del agua residual en una industria láctea de la  
región de Puno"

Es un tema original.


Declaro que el presente trabajo de tesis es elaborado por mi persona y **no existe plagio/copia** de ninguna naturaleza, en especial de otro documento de investigación (tesis, revista, texto, congreso, o similar) presentado por persona natural o jurídica alguna ante instituciones académicas, profesionales, de investigación o similares, en el país o en el extranjero.

Dejo constancia que las citas de otros autores han sido debidamente identificadas en el trabajo de investigación, por lo que no asumiré como tuyas las opiniones vertidas por terceros, ya sea de fuentes encontradas en medios escritos, digitales o Internet.

Asimismo, ratifico que soy plenamente consciente de todo el contenido de la tesis y asumo la responsabilidad de cualquier error u omisión en el documento, así como de las connotaciones éticas y legales involucradas.

En caso de incumplimiento de esta declaración, me someto a las disposiciones legales vigentes y a las sanciones correspondientes de igual forma me someto a las sanciones establecidas en las Directivas y otras normas internas, así como las que me alcancen del Código Civil y Normas Legales conexas por el incumplimiento del presente compromiso

Puno 17 de diciembre del 2024

  
FIRMA (obligatoria)



Huella



## ANEXO 6. Autorización para el depósito de tesis en el Repositorio Institucional



Universidad Nacional  
del Altiplano Puno



Vicerrectorado  
de Investigación



Repositorio  
Institucional

### AUTORIZACIÓN PARA EL DEPÓSITO DE TESIS O TRABAJO DE INVESTIGACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Por el presente documento, Yo Amelia Huarahua Ramos,  
identificado con DNI 77043983 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional,  Programa de Segunda Especialidad,  Programa de Maestría o Doctorado

Ingeniería Química,  
informo que he elaborado el/la  Tesis o  Trabajo de Investigación denominada:

“Eficiencia del *Opuntia ficus-indica* con sulfato de aluminio para la  
clarificación del agua residual en una industria láctea de la región  
de Puno”

para la obtención de  Grado,  Título Profesional o  Segunda Especialidad.

Por medio del presente documento, afirmo y garantizo ser el legítimo, único y exclusivo titular de todos los derechos de propiedad intelectual sobre los documentos arriba mencionados, las obras, los contenidos, los productos y/o las creaciones en general (en adelante, los “Contenidos”) que serán incluidos en el repositorio institucional de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno.

También, doy seguridad de que los contenidos entregados se encuentran libres de toda contraseña, restricción o medida tecnológica de protección, con la finalidad de permitir que se puedan leer, descargar, reproducir, distribuir, imprimir, buscar y enlazar los textos completos, sin limitación alguna.

Autorizo a la Universidad Nacional del Altiplano de Puno a publicar los Contenidos en el Repositorio Institucional y, en consecuencia, en el Repositorio Nacional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación de Acceso Abierto, sobre la base de lo establecido en la Ley N° 30035, sus normas reglamentarias, modificatorias, sustitutorias y conexas, y de acuerdo con las políticas de acceso abierto que la Universidad aplique en relación con sus Repositorios Institucionales. Autorizo expresamente toda consulta y uso de los Contenidos, por parte de cualquier persona, por el tiempo de duración de los derechos patrimoniales de autor y derechos conexos, a título gratuito y a nivel mundial.

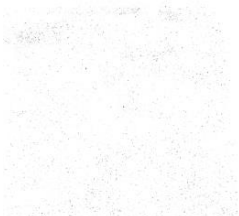
En consecuencia, la Universidad tendrá la posibilidad de divulgar y difundir los Contenidos, de manera total o parcial, sin limitación alguna y sin derecho a pago de contraprestación, remuneración ni regalía alguna a favor mío; en los medios, canales y plataformas que la Universidad y/o el Estado de la República del Perú determinen, a nivel mundial, sin restricción geográfica alguna y de manera indefinida, pudiendo crear y/o extraer los metadatos sobre los Contenidos, e incluir los Contenidos en los índices y buscadores que estimen necesarios para promover su difusión.

Autorizo que los Contenidos sean puestos a disposición del público a través de la siguiente licencia:

Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional. Para ver una copia de esta licencia, visita: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

En señal de conformidad, suscribo el presente documento.

Puno 17 de diciembre del 2024



Amelia Huarahua Ramos  
FIRMA (obligatoria)



Huella