



**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA**



**REMOCIÓN DE PLOMO Y TURBIDEZ CON PENCA DE TUNA  
(*Opuntia ficus-indica* (L.) Miller) Y POLIACRILAMIDA EN AGUAS  
CON RELAVES MINEROS DEL LAGO COMUNI LA RINCONADA**

**TESIS**

**PRESENTADA POR:**

**Bach. KEAVY LINDSAY PAYE ZUNI**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

**INGENIERO QUÍMICO**


**PUNO – PERÚ**

**2024**



# KEAVY LINDSAY PAYE ZUNI

## REMOCIÓN DE PLOMO Y TURBIDEZ CON PENCA DE TUNA (Opuntia ficus-indica (L.) Miller) Y POLIACRILAMIDA E

 My Files

 My Files

 Universidad Nacional del Altiplano

### Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::8254:417179318

Fecha de entrega

18 dic 2024, 7:22 a.m. GMT-5

Fecha de descarga

18 dic 2024, 7:27 a.m. GMT-5

Nombre de archivo

REMOCIÓN DE PLOMO Y TURBIDEZ CON PENCA DE TUNA (Opuntia ficus-indica (L.) Miller) Y POLI....docx

Tamaño de archivo

9,5 MB

154 Páginas

23,416 Palabras

126,459 Caracteres








## 12% 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

- 11%  Fuentes de Internet
- 1%  Publicaciones
- 8%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

### Marcas de integridad

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

- ▶ **Caracteres reemplazados**  
44 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: 18.12.2024 08:54:13 -05:00

Universidad Nacional del Altiplano  Firmado digitalmente por OUILLE CALIZAYA German FAU 20145496170 soft  
Motivo: Soy el autor del documento  
Fecha: 18.12.2024 07:28:30 -05:00





## DEDICATORIA

A Dios, por iluminar mi camino con sabiduría y darme la fortaleza necesaria para alcanzar cada uno de mis metas.

A mi familia, por estar siempre a mi lado, brindándome su apoyo incondicional y siendo el pilar de todo lo que he logrado. En especial, a mis padres, Pedro Paye y Gaby Zuni, por ser un ejemplo de perseverancia y esfuerzo, que me ha preparado para enfrentar cualquier reto. Y a mi gato Diego, por su inigualable compañía.

**Keavy Lindsay Paye Zuni**



## AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional del Altiplano que es mi alma mater, en especial a la Facultad de Ingeniería Química, a sus docentes por su gran profesionalismo, por su enseñanza y orientación brindada.

A los miembros de mi jurado y al Dr. Edwin Guido Boza Condorena, por su invaluable orientación, paciencia y constante apoyo, que fueron fundamentales para el desarrollo de esta investigación.

**Keavy Lindsay Paye Zuni**



# 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>16</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>17</b>
<b>CAPÍTULO I</b>	
<b>INTRODUCCIÓN</b>	
<b>1.1. OBJETIVO GENERAL .....</b>	<b>19</b>
<b>1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....</b>	<b>19</b>
<b>CAPÍTULO II</b>	
<b>REVISIÓN DE LITERATURA</b>	
<b>2.1. RELAVES MINEROS.....</b>	<b>20</b>
<b>2.2. CONTAMINACIÓN POR PLOMO Y TURBIDEZ .....</b>	<b>21</b>
2.2.1. Química del plomo .....	21
2.2.2. Especiación en aguas contaminadas.....	22



2.2.3.	Factores que influyen .....	23
2.2.4.	Turbidez .....	24
<b>2.3.</b>	<b>MÉTODOS DE TRATAMIENTO DE AGUAS CONTAMINADAS.....</b>	<b>25</b>
2.3.1.	Coagulación - floculación .....	25
2.3.1.1.	Coagulación:.....	25
2.3.1.1.1.	<i>Opuntia ficus-indica</i> (L.) Miller .....	26
2.3.1.2.	Floculación: .....	29
2.3.1.2.1.	Poliacrilamida aniónica .....	30
2.3.2.	Sedimentación .....	32
<b>2.4.</b>	<b>SINERGIA ENTRE COAGULANTES NATURALES Y FLOCULANTES SINTÉTICOS .....</b>	<b>32</b>
<b>2.5.</b>	<b>PRUEBA DE JARRAS.....</b>	<b>33</b>
<b>2.6.</b>	<b>LEGISLACIÓN Y NORMATIVAS.....</b>	<b>34</b>
<b>2.7.</b>	<b>ANTECEDENTES .....</b>	<b>36</b>

### CAPÍTULO III

#### MATERIALES Y MÉTODOS

<b>3.1.</b>	<b>UBICACIÓN DE EJECUCIÓN DEL PROYECTO .....</b>	<b>51</b>
<b>3.2.</b>	<b>UBICACIÓN DEL PUNTO DE MUESTREO.....</b>	<b>51</b>
3.2.1.	Ubicación política .....	51
3.2.2.	Ubicación geográfica UTM.....	51
3.2.3.	Accesibilidad.....	53
<b>3.3.</b>	<b>POBLACIÓN Y MUESTRA.....</b>	<b>53</b>
3.2.1.	Población.....	53



3.2.2.	Muestra.....	53
<b>3.3.</b>	<b>METODOLOGÍA .....</b>	<b>55</b>
3.3.1.	Tipo de investigación .....	55
3.3.2.	Materiales, equipos y reactivos .....	55
<b>3.4.</b>	<b>MÉTODO EXPERIMENTAL.....</b>	<b>56</b>
3.4.1.	Evaluación de los parámetros físico- químicos.....	<b>56</b>
3.4.2.	Ensayos de coagulación-floculación .....	<b>57</b>
3.4.3.	Análisis de datos para demostrar la eficiencia .....	<b>60</b>
3.4.3.1.	Estimación del efecto de las variables.....	63
3.4.3.1.1.	Determinación del porcentaje de remoción de plomo y turbidez 64	
3.4.3.1.2.	Ajuste a un modelo de regresión .....	64
3.4.3.1.3.	Análisis de varianza.....	65
3.4.3.1.4.	Superficie de respuesta y gráfico de contorno.....	66
3.4.3.1.5.	Localización del punto estacionario .....	66

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

<b>4.1.</b>	<b>CARACTERÍSTICAS FISICOQUÍMICAS DE LAS AGUAS DEL LAGO COMUNI.....</b>	<b>68</b>
<b>4.2.</b>	<b>EFFECTO DE LAS VARIABLES PARA LA REMOCIÓN DE PLOMO Y TURBIDEZ.....</b>	<b>69</b>
4.2.1.	Influencia del pH.....	69
4.2.2.	Efecto de las variables en la remoción de plomo .....	71
4.2.3.	Efecto de las variables en la remoción de turbiedad .....	77





<b>4.2. REMOCIÓN DE PLOMO Y TURBIDEZ DE LAS AGUAS CON RELAVES</b>	
<b>MINEROS DEL LAGO COMUNI .....</b>	<b>83</b>
4.3.1. Diseño experimental de Box-Wilson .....	83
4.3.2. Modelo de regresión.....	84
4.3.3. Análisis de varianza .....	85
4.3.4. Superficie de respuesta y gráfico de contorno .....	89
4.3.4.1. Superficie de respuesta y gráfico de contorno para la remoción de plomo	89
4.3.4.2. Superficie de respuesta y gráfico de contorno para la remoción de turbiedad .....	94
4.3.5. Localización del punto estacionario.....	99
4.3.6. Análisis de máximos y mínimos .....	101
<b>V. CONCLUSIONES.....</b>	<b>105</b>
<b>VI. RECOMENDACIONES .....</b>	<b>107</b>
<b>VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>108</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>114</b>

**ÁREA:** Tecnologías ambientales y recurso naturales

**TEMA:** Tratamiento de aguas

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



## ÍNDICE DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
<b>Tabla 1</b> Parámetros físicos del Plomo.....	21
<b>Tabla 2</b> Descripción completa de la clasificación científica de la tuna. ....	28
<b>Tabla 3</b> Composición química de 100g de <i>Opuntia ficus-indica</i> (L.) Miller fresco. 28	28
<b>Tabla 4</b> Accesibilidad al punto de muestreo .....	53
<b>Tabla 5</b> Parámetros del proceso y sus niveles para el diseño experimental.....	61
<b>Tabla 6</b> Matriz del diseño experimental de Box-Wilson para 3 variables. ....	63
<b>Tabla 7</b> Análisis de varianza del modelo de segundo orden. ....	66
<b>Tabla 8</b> Caracterización de los Parámetros Fisicoquímicos evaluados en el Lago Comuni.....	68
<b>Tabla 9</b> Efecto del pH en la Remoción de Plomo y Turbidez en el Proceso de Coagulación-Floculación. ....	70
<b>Tabla 10</b> Remoción de plomo de las aguas con relave minero del lago Comuni de La Rinconada. ....	72
<b>Tabla 11</b> Porcentajes de remoción de plomo de las aguas con relave minero del lago Comuni de La Rinconada.....	73
<b>Tabla 12</b> Remoción de turbiedad de las aguas con relave minero del lago Comuni de La Rinconada .....	78
<b>Tabla 13</b> Porcentajes de remoción de turbiedad de las aguas con relave minero del lago Comuni de La Rinconada.....	79
<b>Tabla 14</b> Matriz del diseño de Box-Wilson y respuestas observadas. ....	83
<b>Tabla 15</b> Coeficientes de regresión del modelo ajustado para la remoción de plomo y turbiedad. ....	84
<b>Tabla 16</b> Análisis de varianza del modelo de regresión para la remoción de plomo..	86



<b>Tabla 17</b>	Análisis de varianza del modelo de regresión para la remoción de turbiedad. .....	88
<b>Tabla 18</b>	Análisis de varianza del modelo de segundo orden. ....	133



## ÍNDICE DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
<b>Figura 1</b> Partes de <i>Opuntia ficus-indica</i> (L.) Miller.....	27
<b>Figura 2</b> Partes del equipo prueba de jarras .....	34
<b>Figura 3</b> Mapa Satelital de La Rinconada.....	52
<b>Figura 4</b> Mapa Satelital del Lago Comuni.....	54
<b>Figura 5</b> Gráfico de efectos de las variables para la remoción de plomo. ....	75
<b>Figura 6</b> Gráfico de interacción para la remoción de plomo.....	76
<b>Figura 7</b> Gráfico de efectos de las variables para la remoción de turbiedad. ....	80
<b>Figura 8</b> Gráfico de interacción para la remoción de turbiedad.....	82
<b>Figura 9</b> Gráfico de superficie de respuesta y contorno para el efecto de concentración de <i>Opuntia ficus-indica</i> (L.) Miller y concentración de poliacrilamida para la remoción de plomo. ....	90
<b>Figura 10</b> Gráfico de superficie de respuesta y contorno para el efecto de concentración de <i>Opuntia ficus-indica</i> (L.) Miller y tiempo de sedimentación para la remoción de plomo. ....	91
<b>Figura 11</b> Gráfico de superficie de respuesta y contorno para el efecto de concentración de poliacrilamida y tiempo de sedimentación para la remoción de plomo. ....	92
<b>Figura 12</b> Gráfico de superficie de respuesta y contorno para el efecto de concentración de <i>Opuntia ficus-indica</i> (L.) Miller y concentración de poliacrilamida para la remoción de turbiedad. ....	95
<b>Figura 13</b> Gráfico de superficie de respuesta y contorno para el efecto de concentración de <i>Opuntia ficus-indica</i> (L.) Miller y tiempo de sedimentación para la remoción de turbiedad. ....	96



**Figura 14** Gráfico de superficie de respuesta y contorno para el efecto de concentración de poliacrilamida y tiempo de sedimentación para la remoción de turbiedad. .... 97



## ÍNDICE DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
<b>ANEXO 1</b> Especificaciones técnicas de poliacrilamida Aniónica.....	114
<b>ANEXO 2</b> Límites máximos permisibles de parámetros de calidad.....	115
<b>ANEXO 3</b> Límites máximos permisibles de parámetros químicos inorgánicos y orgánicos.....	116
<b>ANEXO 4</b> Cadena de Custodia - LAQUAMEQ E.I.R.L. ....	117
<b>ANEXO 5</b> Resultados del análisis físico químico y metales del agua .....	118
<b>ANEXO 6</b> Fotografías del desarrollo de las tesis realizadas en el laboratorio.....	122
<b>ANEXO 7</b> Determinación de los coeficientes del modelo de regresión de segundo orden.....	128
<b>ANEXO 8</b> Cálculos para el análisis de varianza (ANOVA).....	133
<b>ANEXO 9</b> Cuadro de Matriz de Consistencia.....	150
<b>ANEXO 10</b> Declaración jurada de autenticidad de tesis.....	153
<b>ANEXO 11</b> Autorización para el depósito de tesis en el Repositorio Institucional....	154



## ACRÓNIMOS

NTU:	Nephelometric Turbidity Unit, unidad de medición para la turbidez
Pb:	Plomo
Co:	Concentración de <i>Opuntia ficus-indica</i> (L.) Miller
Cp:	Concentración de poliacrilamida
t:	Tiempo de sedimentación
%R <sub>1</sub> :	Porcentaje de remoción de plomo
%R <sub>2</sub> :	Porcentaje de remoción de turbiedad
pH:	Potencial de hidrógeno
mg.L <sup>-1</sup> :	Miligramos por litro
L:	Litros
g:	Gramos
°C:	Temperatura
ppm:	Partes por millón
RPM:	Revoluciones por minuto
UTM:	Universal Terminator Marcator



## RESUMEN

La polución del Lago Comuni - La Rinconada, debido a los relaves mineros, constituye una amenaza crítica para la calidad del recurso hídrico local. El objetivo principal es evaluar la eficiencia de *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller y poliacrilamida en la remoción de plomo y turbidez de las aguas con relaves mineros. La metodología es cuantitativa experimental, tomando muestras fijas del Lago Comuni según Resolución Jefatural N° 010-2016-ANA, para analizar las características físico-químicas del agua (temperatura, pH, concentración de plomo y turbidez). Para este tratamiento, se alcalinizó el agua con 0,02 g de CaO, logrando un pH de 8,8-9,5. Se añadieron *Opuntia* y poliacrilamida en concentraciones de 15, 25, 30, 45 mg.L<sup>-1</sup>, con agitación rápida (150 rpm, 1 min) y lenta (80 rpm, 15 min), seguido de 30 minutos de sedimentación. Para el diseño experimental, se utilizó la Metodología de Superficie de Respuesta con el diseño de Box-Wilson, considerando tres variables: concentración de *Opuntia*, concentración de poliacrilamida y tiempo de sedimentación. El experimento consistió en 17 pruebas analizadas con Statgraphics y Design-Expert. Los resultados mostraron una temperatura de 14,3°C, un pH de 6,48 de la muestra, turbidez de 364 NTU, concentración inicial de plomo de 0,0278 mg.L<sup>-1</sup> reduciéndose a 0,0006 mg.L<sup>-1</sup> es decir el 98% y se logró una remoción total del 100% de la turbidez. En conclusión, se alcanzó un porcentaje significativo de remoción de plomo y turbidez, validando la eficacia de *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller y poliacrilamida como soluciones efectivas para mejorar la calidad del agua.

**Palabras Clave:** Lago Comuni, Penca de Tuna (*Opuntia ficus-indica* (L.) Miller), Plomo, Poliacrilamida, Prueba de Jarras, Turbidez.





## ABSTRACT

The pollution of Lake Comuni - La Rinconada, due to mining tailings, constitutes a critical threat to the quality of the local water resource. The main objective is to evaluate the efficiency of *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller and polyacrylamide in the removal of lead and turbidity from water with mining tailings. The methodology is experimental quantitative, taking fixed samples from Lake Comuni based on Directive Resolution N° 010-2016-ANA, to analyze the physicochemical characteristics of the water (temperature, pH, lead concentration, and turbidity). For this treatment, the water was alkalized with 0,02 g of CaO, achieving a pH of 8,8-9,5. *Opuntia* and polyacrylamide were added in concentrations of 15, 25, 30, 45 mg.L<sup>-1</sup>, with rapid agitation (150 rpm, 1 min) and slow agitation (80 rpm, 15 min), followed by 30 minutes of sedimentation. For the experimental design, the Response Surface Methodology with the Box-Wilson design was used, considering three variables: *Opuntia* concentration, polyacrylamide concentration, and sedimentation time. The experiment consisted of 17 tests analyzed with Statgraphics and Design-Expert. The results showed a temperature of 14,3°C, a pH of 6,48 of the sample, turbidity of 364 NTU, and an initial lead concentration of 0,0278 mg.L<sup>-1</sup> reducing to 0,0006 mg.L<sup>-1</sup>, that is 98%, and a total removal of 100% of turbidity was achieved. In conclusion, a significant percentage of lead and turbidity removal was achieved, validating the effectiveness of *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller and polyacrylamide as effective solutions for improving water quality.

**Keywords:** Lake Comuni, Prickly Pear (*Opuntia ficus-indica* (L.) Miller), Lead, Polyacrylamide, Jar Test, Turbidity.



# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

La minería en La Rinconada, una de las áreas mineras más altas del mundo, representa un desafío complejo tanto desde el punto de vista ambiental como social. En esta localidad peruana, situada a más de 5000 metros sobre el nivel del mar, la minería se realiza en condiciones extremas y a menudo sin el debido control ambiental (Villena et al., 2019). Esta actividad está marcada por una alta informalidad, donde las regulaciones ambientales y de seguridad son frecuentemente ignoradas, exacerbando la degradación ambiental y los riesgos para las comunidades. Los relaves mineros del lago Comuni representan un grave problema ambiental debido a la gestión inadecuada de los desechos mineros, que a menudo se depositan en áreas cercanas al lago o se dispersan en el entorno (Villena et al., 2019). El incremento de la turbidez no solo reduce la penetración de luz, afectando negativamente a la flora acuática al interferir con la fotosíntesis y alterando de esta manera el ecosistema acuático, sino que también contribuye a la disminución de la calidad del agua (Vargas et al., 2020).

Este tipo de contaminación afecta a la principal fuente de agua, el Lago Comuni, para el 89% de los habitantes de La Rinconada, un cuerpo de agua sin tratar ubicado cerca de la mina. Esta agua, transportada en cisternas, presenta niveles elevados de contaminación. El resto de la población depende del agua de deshielo, que también se encuentra contaminada. La falta de acceso a agua potable ha generado una crisis sanitaria, evidenciada por el alto índice de enfermedades diarreicas y el elevado número de muertes relacionadas con estas patologías, como lo demuestran los datos del Ministerio de Salud (Gómez et al., 2009).



La necesidad de realizar un tratamiento adecuado a estas aguas es primordial para los habitantes de la Rinconada, esta investigación propone utilizar coagulantes derivados de fuentes vegetales, como la penca de tuna (*Opuntia ficus-indica* (L.) Miller) y usar floculante sintético como poliacrilamida, ya que está diseñado específicamente para agregación de partículas suspendidas (Bortone et al., 2018). Esta combinación optimiza la calidad del agua tratada mediante la reducción eficiente de turbidez y contaminantes, ofrece una solución más costo-efectiva y sostenible al reducir el uso de compuestos sintéticos y maximizando las propiedades biodegradables de los coagulantes naturales.

### **1.1. OBJETIVO GENERAL**

Determinar la eficiencia de la penca de tuna (*Opuntia ficus-indica* (L.) Miller) y poliacrilamida en la remoción de plomo y turbidez de las aguas con relaves mineros del lago Comuni en el centro poblado La Rinconada.

### **1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

1. Determinar las características físico químicas y la concentración de plomo y turbidez presentes en aguas con relaves mineros del lago Comuni del centro poblado La Rinconada.
2. Realizar un estudio exploratorio del efecto de las concentraciones de la penca de tuna (*Opuntia ficus-indica* (L.) Miller) y poliacrilamida en la remoción de plomo y turbidez de aguas con relaves mineros del lago Comuni en el centro poblado La Rinconada.
3. Determinar la concentración óptima de la penca de tuna (*Opuntia ficus-indica* (L.) Miller) y poliacrilamida para hallar el porcentaje de remoción de plomo y turbidez de las aguas con relaves mineros del lago Comuni.



## CAPÍTULO II

### REVISIÓN DE LITERATURA

#### 2.1. RELAVES MINEROS

Según Dammert & Molinelli, la minería es una “Actividad extractiva que consiste en la obtención selectiva de minerales y otros materiales de la corteza terrestre, lo cual, en muchos casos, implica la extracción masiva de materiales para obtener cantidades mínimas del producto deseado” (2007, p. 13).

Durante este proceso tienen origen, como subproducto, los llamados relaves mineros, los cuales son materiales sobrantes del procesamiento del mineral extraído en las actividades mineras. Los relaves mineros se componen por una mezcla de rocas molidas, agua y minerales de ganga. Además de las partículas de roca finamente molidas, los relaves contienen productos químicos, minerales y, a menudo, grandes cantidades de cianuro, mercurio, arsénico, plomo y aluminio, entre otros metales pesados y sustancias tóxicas.

La minería es una actividad vinculada a la economía y al medio ambiente. Según Dammert et ál. (2007) es sustento de la industria manufacturera, así impulsando el crecimiento económico en países en desarrollo, pero también genera pasivos ambientales y conflictos sociales significativos. Una de las consecuencias negativas de los procesos de la actividad minera es la generación de los llamados relaves mineros.

Entre los impactos ambientales se destaca la capacidad de estos para romper los equilibrios de los ecosistemas, afectar la salud pública. Y degradar cuerpos de agua a través de la filtración al entorno o infiltración en las napas subterráneas, contaminar el suelo con metales pesados y el aire mediante levantamiento y arrastre de material fino

por acción del viento, como así también modificar paisajes naturales. (Cruzado & Bravo, 2010, pp. 6-11).

## 2.2. CONTAMINACIÓN POR PLOMO Y TURBIDEZ

### 2.2.1. Química del plomo

El plomo es un “Metal pesado de color gris azulado, brillante en superficies recientes, blando, maleable y el menos tenaz de todos los metales, posee gran densidad y punto de fusión bajo, cristaliza en octaedros, y deja en el papel una mancha gris” (Ubillus, 2003, pp. 25-31).

**Tabla 1**

*Parámetros físicos del Plomo*

<b>Características</b>	
Densidad	11,85
Número atómico	82
Símbolo	Pb
Peso atómico	207,21
Abundancia de isótopos	208: 52,3%
	206: 23,6%
	207: 22,6%
	204: 1,5%
Solubilidad	Poco soluble en agua
Sistema cristalino	Regular
Estado físico	Sólido grisáceo
Punto de fusión	326,9°C
Estados de oxidación	+2 y +4
Punto de ebullición	1613°C
Punto de ebullición	1750°C

Fuente: (Ubillus, 2003, p. 23).

El plomo reacciona con ácidos para formar sales solubles y es conocido por su toxicidad, especialmente cuando se ingiere o inhala en formas que pueden ser absorbidas por el cuerpo humano. En soluciones acuosas, el ion plomo (II) ( $Pb^{2+}$ ) es predominantemente soluble y puede precipitar como sulfato o carbonato



en condiciones específicas. El ion plomo (IV) ( $Pb^{4+}$ ) es menos común y tiende a ser más reactivo, formando compuestos insolubles. Ambos estados de oxidación del plomo son conocidos por su toxicidad significativa cuando están presentes en formas solubles y son absorbidos por organismos vivos.

### 2.2.2. Especiación en aguas contaminadas

La especiación se refiere a la distribución del plomo en diferentes formas químicas y físicas en las que el plomo puede existir, cada una con implicaciones distintas para la toxicidad y la movilidad en el medio ambiente.

- Plomo Elemental ( $Pb^0$ ): El plomo metálico puro, poco común en condiciones naturales debido a su reactividad, aunque el plomo metálico puro tiene interesantes propiedades, su alta reactividad hace que en condiciones naturales se encuentre principalmente en forma de compuestos minerales. La obtención de plomo metálico requiere de procesos de extracción y refinado a partir de minerales como la galena.
- Plomo Inorgánico ( $Pb^{2+}$ ,  $Pb^{4+}$ ): El plomo puede existir como ion  $Pb^{2+}$  en soluciones acuosas, siendo soluble y móvil en el agua.  $Pb^{4+}$  es menos común y más reactivo, formando compuestos insolubles (US Epa, 2013).
- Compuestos Orgánicos de Plomo: Los compuestos orgánicos de plomo (COP) son un grupo de sustancias químicas que se forman por la unión del plomo con moléculas orgánicas. A diferencia del plomo inorgánico, que se encuentra principalmente en forma de sales, los COP tienen una estructura molecular más compleja que incluye enlaces carbono – plomo, como el tetraetilo de plomo utilizado en gasolinas ( $Pb(C_2H_5)_4$ ). Son solubles con grasas. (OAS, 2023).



- **Partículas de Plomo:** Partículas sólidas de plomo, como polvo o aerosoles, que pueden transportarse por el aire o sedimentarse en suelos y aguas (US Epa, 2013).
- **Plomo Adsorbido y Precipitado:** El Plomo adsorbido se encuentra en un estado físico unido a la superficie de otras partículas. La adsorción es un proceso reversible, lo que significa que el plomo adsorbido puede volver a liberarse a la fase líquida o gaseosa bajo ciertas condiciones (US Epa, 2013). El Plomo precipitado, se encuentra en un estado físico separado del medio ambiente, formando sales insolubles. La precipitación es un proceso irreversible en la mayoría de los casos, lo que significa que el plomo precipitado permanece en forma sólida y no se disuelve fácilmente en el agua (US Epa, 2013).

### **2.2.3. Factores que influyen**

- **pH del Agua:** El pH afecta la solubilidad del plomo, siendo más soluble en aguas ácidas (pH bajo) y menos soluble en aguas alcalinas (pH alto). Esto influye en su disponibilidad y potencial de toxicidad (US Epa, 2013).
- **Oxidación-Reducción (Redox) del Medio:** Condiciones redox variables en el agua y sedimentos pueden alterar la forma y movilidad del plomo, por ejemplo, transformándolo entre formas más o menos solubles (US Epa, 2013).
- **Contenido de Materia Orgánica:** Compuestos orgánicos en el agua pueden formar complejos con el plomo, afectando su solubilidad y bioaccesibilidad (US Epa, 2013).



- Concentración de Otros Iones: La presencia de otros iones en el agua, como sulfatos, carbonatos y cloruros, puede competir con el plomo por sitios de adsorción o influir en su solubilidad (US Epa, 2013).
- Actividad Microbiana: Las bacterias que participan en los procesos redox del plomo incluyen bacterias sulfato-reductoras, metanogénicas y nitrificantes, y algunas algas pueden absorber plomo en sus superficies celulares o acumularlo en sus tejidos (US Epa, 2013).

#### **2.2.4. Turbidez**

Para Alanya la turbidez o turbiedad del agua es un “Parámetro físico químico importante para conocer la calidad del agua y el control de ello está relacionado con la eficiencia sobre procesos de desinfección químicos y físicos cabe mencionar (a mayor turbiedad, mayores partículas en suspensión)” (Alanya, 2024, p. 27). En el contexto de la minería, la turbidez se refiere a la pérdida de transparencia del agua debido a la presencia de partículas en suspensión, generalmente sedimentos, minerales y/o residuos.

Las causas de la turbidez en la minería se dan, por un lado, por los sedimentos suspendidos producidos por la erosión del suelo y la eliminación de vegetación, especialmente en la minería a cielo abierto. Estas actividades reducen la estabilidad del suelo y aumentan la escorrentía superficial, aumentando la cantidad de sedimentos en los cuerpos de agua. Estos sedimentos incluyen partículas de arcilla, limo y arena que no se asientan rápidamente (Belloti, 2006, pp.2-6).

Por otro lado, los lixiviados de pilas de desechos mineros y relaves pueden contener partículas finas y metales pesados que también contribuyen a la turbidez





cuando estos se mezclan con cuerpos de agua. Además, las actividades mineras pueden liberar contaminantes químicos que se unen a las partículas de sedimento, aumentando la turbidez y la contaminación del agua. Esto incluye reactivos utilizados en el procesamiento de minerales que pueden incrementar la cantidad de partículas finas en suspensión (Burillo et al, 2017).

Los relaves mineros son los residuos sólidos y líquidos que quedan después de la extracción de minerales. Si no se gestionan adecuadamente, los relaves pueden ser liberados en el medio ambiente, aumentando la turbidez del agua.

## **2.3. MÉTODOS DE TRATAMIENTO DE AGUAS CONTAMINADAS**

La distribución de los métodos para el tratamiento de los contaminantes presentes en las aguas generalmente industriales depende de diversas circunstancias y agentes.

### **2.3.1. Coagulación - floculación**

Este es un mecanismo utilizado, generalmente, para la potabilización del agua. A través de este, se eliminan los sólidos suspendidos mediante la desestabilización de la materia coloidal y posterior formación y sedimentación de flóculos.

#### **2.3.1.1. Coagulación:**

La coagulación es un proceso físico-químico fundamental en la eliminación de materia coloidal o suspendida en soluciones. Durante este proceso, se neutraliza la carga eléctrica de las partículas en suspensión, lo que reduce la repulsión entre ellas y facilita su aglomeración. Esta aglomeración se produce principalmente por la acción de las fuerzas de

Van der Waals, que son interacciones débiles pero significativas entre moléculas. (Orihuela, 2022, p. 38)

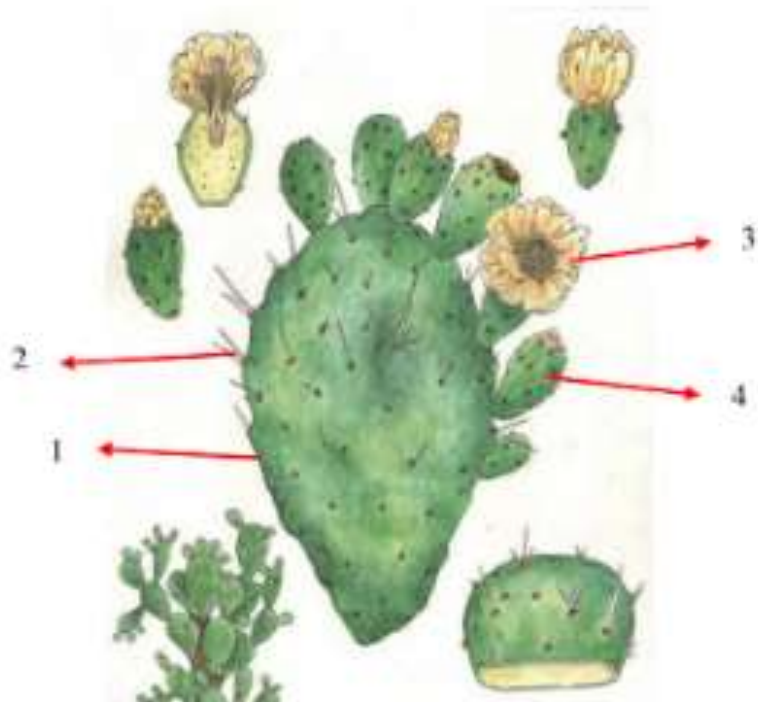
Los coagulantes más utilizados en el tratamiento de aguas y en diversas aplicaciones industriales incluyen el cloruro férrico ( $\text{FeCl}_3$ ), el sulfato férrico ( $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ ) y el sulfato de aluminio ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ). Estos compuestos son eficaces para desestabilizar las partículas coloidales y promover su formación de flóculos que se pueden remover posteriormente. (Orihuela, 2022, p. 39) Además de los coagulantes químicos, existen opciones naturales que también se emplean en la coagulación.

#### **2.3.1.1.1. *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller**

La tuna (*Opuntia*) es un recurso de gran importancia en los sistemas agro-pastoriles de los Andes peruanos. Es una planta adaptada a la sequía, posee un sistema radical extenso y ramificado con raíces cerca de la superficie para aprovechar el agua disponible. Su tallo es leñoso de 20 a 50 cm de diámetro y sus ramas son cladodios aplanados que realizan la fotosíntesis como si fueran hojas. Para resistir la sequía, la tuna tiene adaptaciones especiales como una cutícula gruesa que reduce la pérdida de agua, cera o pelos en la superficie que lo protegen adicionalmente y un tejido llamado parénquima que almacena agua. (Silva, 2017, p. 16) La *Figura N°2* se identifica: 1) Cladodio o Penca, 2) Espinas, 3) Flor y 4) Fruto.

### Figura 1

*Partes de Opuntia ficus-indica (L.) Miller.*



El nombre "*Opuntia ficus-indica* (L.) Miller" se refiere a la tuna o higo chumbo, una planta que se adapta bien a las condiciones climáticas de la región andina. El término "*Opuntia*" proviene del latín, relacionado con cactáceas mencionadas por los romanos, mientras que "*ficus-indica*" combina "*ficus*", que alude a la higuera, y "*indica*", sugiriendo un vínculo con la India. La notación "(L.) Miller" indica que Carl Linnaeus fue el primero en describir la especie, y Philip Miller la revisó.

**Tabla 2**

*Descripción completa de la clasificación científica de la tuna.*

<b>CLASIFICACIÓN CIENTÍFICA</b>	
Reino	Vegetal
Subreino	Embryophita
División	Angiospermae
Clase	Dicotyledonea
Subclase	Dialipetalas
Orden	Opuntiales
Familia	Cactácea
Subfamilia	Opuntioideae
Tribu	Opuntiae
Género	Opuntia Nopalea
Subgénero	5
Especies	300

Fuente: (Ubillus, 2003, pp. 25-31).

**Tabla 3**

*Composición química de 100g de Opuntia ficus-indica (L.) Miller fresco.*

<b>PARÁMETRO</b>	<b>CONTENIDO</b>
Porción Comestible	78,00
Energía (Kcal)	27,00
Proteínas (g)	1,70
Grasa (g)	0,30
Carbohidratos (g)	5,60
Calcio (mg)	93,00
Hierro (mg)	1,60
Tiamina (mg)	0,03
Riboflavina (mg)	0,06
Niacina (mg)	0,03
Ascórbico (mg)	8,00

Fuente: (De la Rosa & Santana, 2001)



El mucílago de tuna *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller es un heteropolisacárido complejo, compuesto principalmente por arabinosa, galactosa, ramnosa, xilosa y ácido galacturónico, que forma una estructura tridimensional similar a una red. Esta sustancia, presente en cladodios y frutos, cumple diversas funciones en la planta, como el almacenamiento de agua, la protección y la interacción con microorganismos. Su composición puede variar significativamente dependiendo de factores como la especie de tuna y las condiciones de cultivo. Debido a sus propiedades viscosificantes, gelificantes y formadoras de películas, el mucílago de tuna *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller tiene un gran potencial en diversas industrias, como la alimentaria, cosmética, farmacéutica y textil. Sin embargo, su extracción y purificación presentan desafíos debido a la complejidad de su estructura y a la variabilidad en su composición. (Silva, 2017, p. 16).

#### **2.3.1.2. Flocculación:**

La flocculación viene a ser un proceso de aglomeración de partículas donde se forman, en primer lugar, los micro flóculos y, posteriormente, los flóculos, que son las mismas partículas, pero en mayor tamaño. En este proceso, también se hace uso de los flocculantes que favorecen la formación de los flóculos y, generalmente, son polímeros inorgánicos (naturales o sintéticos). Así, al ser las partículas de mayor tamaño, la sedimentación resulta más fácil. (Orihuela, 2022, p. 38).

Su naturaleza química puede ser diversa, clasificándose en flocculantes minerales (como los silicatos de aluminio), orgánicos naturales



(como los almidones modificados o las quitosanas) y orgánicos de síntesis (como las poliacrilamidas). La eficacia de un floculante depende de factores como su peso molecular, la densidad de carga, la estructura molecular y las condiciones del sistema (pH, temperatura, concentración de sólidos) Los floculantes son polímeros o Polielectrolitos con pesos moleculares muy elevados moléculas orgánicas solubles en agua formadas por bloques denominados monómeros, repetidos en cadenas larga.

Según Silva los parámetros de la floculación, son:

- Floculación Ortocinética (Se da por el grado de agitación proporcionada: Mecánica o Hidráulica).
- Gradiente de Velocidad (energía necesaria para producir la mezcla).
- Número de colisiones (choque entre microflóculos).
- Tiempo de retención (tiempo que permanece el agua en la unidad de floculación).
- Densidad y tamaño de floculo.
- Volumen de lodos (los flóculos formados no deben sedimentar en las unidades de floculación).

(2017, p. 16).

#### **2.3.1.2.1. Poliacrilamida aniónica**

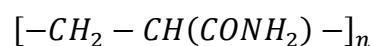
Poliacrilamida aniónica es un tipo de polímero sintético con una carga eléctrica negativa. Pertenece a la familia de los floculantes, sustancias químicas utilizadas para aglomerar partículas pequeñas en suspensiones líquidas, facilitando así su separación del líquido, es un



polímero sintético formado por una cadena principal de átomos de carbono a la que se unen grupos amida (-CONH<sub>2</sub>). Para conferir su carga negativa característica, se incorporan grupos funcionales como el carboxilato (-COO<sup>-</sup>) o el sulfonato (-SO<sub>3</sub><sup>-</sup>) a esta cadena principal. La longitud de la cadena, la densidad de carga y el tipo de grupo funcional utilizado pueden variar considerablemente, lo que resulta en una amplia gama de poliacrilamidas aniónicas con propiedades específicas. Estas moléculas se utilizan ampliamente en diversos procesos industriales, como el tratamiento de aguas y la fabricación de papel, debido a su capacidad para aglomerar partículas y mejorar la separación de sólidos en líquidos. (Ururi, 2018, p. 22).

La fórmula química de la poliacrilamida es: (C<sub>3</sub>H<sub>5</sub>NO)<sub>n</sub>

Donde "n" es el número de unidades repetidas de la molécula y la estructura química de la poliacrilamida se puede representar de la siguiente manera:



Esta fórmula muestra la unidad repetida de la poliacrilamida, que consiste en un grupo metileno (-CH<sub>2</sub>-), un grupo metilo (-CH-), un grupo carboxamido (-CONH<sub>2</sub>) y una cadena polimérica que se repite "n" veces.



### **2.3.2. Sedimentación**

La sedimentación es por definición la separación Sólido-líquido, una decantación por gravedad para separar los sólidos en suspensión. En tratamiento de aguas los procesos de sedimentación utilizados son:

- Tipo I. Para sedimentar partículas discretas no floculadas en una suspensión diluida. Esto puede presentarse debido a la decantación de aguas superficiales antes del tratamiento por filtración de arena.
- Tipo II. Para sedimentar partículas floculadas en una suspensión diluida. Esto puede presentarse después de la coagulación química y floculación donde las partículas no discretas se les ayuda químicamente a coagular.

Otros tipos de sedimentación son combinaciones del tipo I y II.

## **2.4. SINERGIA ENTRE COAGULANTES NATURALES Y FLOCULANTES SINTÉTICOS**

La coagulación y floculación son procesos fundamentales en el tratamiento de agua, y la sinergia entre coagulantes naturales y floculantes sintéticos ha demostrado ser una estrategia eficaz para mejorar la eficiencia y sostenibilidad de estos procesos. Tradicionalmente, se han utilizado coagulantes inorgánicos y polímeros sintéticos. Sin embargo, el creciente interés en métodos más sostenibles ha llevado a explorar la combinación de coagulantes naturales con floculantes sintéticos. Esta combinación ofrece múltiples beneficios, como una mayor eficiencia en la remoción de partículas, una amplia adaptabilidad a diferentes condiciones de pH, una reducción en la dosis de coagulantes requerida, una menor generación de lodos y, en general, un menor impacto ambiental. La sinergia entre estos compuestos se debe a la capacidad de los coagulantes naturales para





ampliar el rango de efectividad de los floculantes sintéticos y mejorar la formación de flóculos.

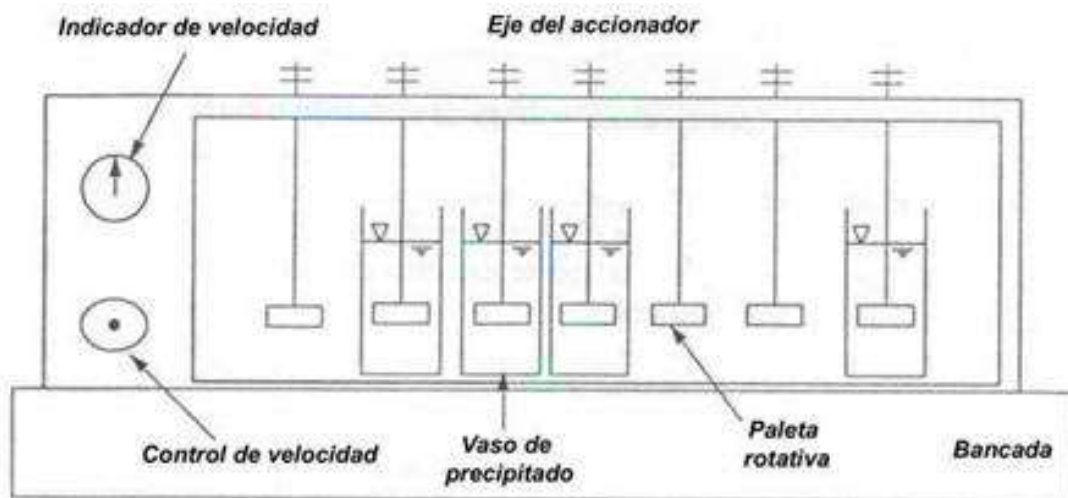
- Mayor eficiencia: La combinación de ambos tipos de coagulantes puede mejorar la eficiencia de la remoción de partículas, especialmente en aguas con características complejas.
- Ampliación del rango de pH: Los coagulantes naturales suelen ser más efectivos en un rango de pH más amplio, lo que permite tratar aguas con diferentes características.
- Reducción de la dosis: Al combinar coagulantes, se puede reducir la dosis total necesaria para lograr la misma eficiencia, lo que conlleva a una reducción de costos.
- Menor generación de lodos: La combinación puede reducir la cantidad de lodos generados, lo que facilita su disposición final.
- Mayor sostenibilidad: El uso de coagulantes naturales contribuye a una mayor sostenibilidad del proceso de tratamiento de agua.

## **2.5. PRUEBA DE JARRAS**

La prueba de jarra es un método a escala piloto utilizado para determinar las condiciones óptimas de tratamiento de aguas. Este procedimiento permite ajustar el pH, variar las dosis de sustancias químicas agregadas a las muestras, modificar las velocidades de mezclado y observar los resultados. Es especialmente útil para simular procesos de coagulación-floculación, que son fundamentales para la remoción de sólidos suspendidos y materia orgánica del agua. (Terroba, L. 2010, p. 68).

**Figura 2**

*Partes del equipo prueba de jarras.*



Fuente: Diagrama del proceso de tratamiento de agua. Tomado de "Tratamiento de aguas parte 1" (2010), Apuntes de Ingeniería Civil. (captura de pantalla tomada el 13 de agosto de 2024).

## 2.6. LEGISLACIÓN Y NORMATIVAS

- Organización Mundial de la Salud (OMS): Desde 1958, la OMS ha dado periódicamente los "Estándares Internacionales de Agua Potable", posteriormente conocidos como "Guías para la Calidad del Agua Potable". Estas directrices internacionales tienen como propósito mejorar la calidad del agua potable y la salud humana, sirviendo como base para que los países establezcan sus propios estándares de agua potable, que incluyen límites máximos permisibles de contaminantes de metales pesados (ej. plomo), patógenos, y otros contaminantes químicos y físicos. (OAS, 2023, p. 6).
- Directiva Marco del Agua de la Unión Europea (2000/60/CE): Desde la década de 1980, la Unión Europea ha intensificado sus políticas legislativas y financieras para mejorar la calidad del agua potable y proteger el medio ambiente. Esta directiva aborda varios puntos clave, como la revisión de los valores paramétricos para fortalecer aquellos que sean necesarios conforme a las



últimas recomendaciones de la OMS y el Comité Científico de Toxicología y Ecotoxicología. (OAS, 2023, p. 13).

Además, establece la legislación basada únicamente en parámetros esenciales para la salud y el ambiente, y exige la elaboración de informes según los estándares ISO/CEN para informar a los consumidores sobre la calidad del agua potable e incluye objetivos de calidad para aguas superficiales, subterráneas y costeras, y fija límites para contaminantes específicos, incluyendo metales pesados. (OAS, 2023, p. 13).

- Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA): La EPA establece normas para la calidad del agua potable en Estados Unidos, son una herramienta importante para restaurar y mantener la calidad del agua en lagos, ríos, arroyos, estuarios y otras fuentes de agua, tanto a nivel nacional como local, incluyendo límites máximos para contaminantes como el plomo.
- Ley de Recursos Hídricos N° 29338: Regula la utilización y administración de los recursos hídricos, aprobada en 2009, su objetivo principal es asegurar la conservación y el uso sostenible del agua. Abarca tanto el agua superficial como la subterránea, y los recursos asociados a ella. Además, se aplica al agua marítima y atmosférica en lo que sea pertinente.
- Estándares de Calidad Ambiental (ECA) Categoría 3: Riego y bebida de animales: están diseñados para regular la calidad del agua destinada al riego y a la bebida de animales, garantizando que cumpla con criterios de salubridad y seguridad para proteger tanto la salud pública como el bienestar animal. Además, promueven el uso responsable y sostenible del agua, requiriendo programas de monitoreo y control para garantizar que las fuentes hídricas se



- mantengan dentro de los estándares establecidos. (Ministerio del Ambiente, 2017).
- Norma Técnica Peruana (NTP 214.046:2013): Establece criterios técnicos específicos para la vigilancia y control de la calidad del agua, asegurando que se cumplan los estándares de salud pública en relación con metales pesados, así como otros contaminantes químicos, microbiológicos y físicos que pueden afectar la salud pública si se encuentran en concentraciones superiores a las permitidas.
  - Ley General de Minería (Ley N° 27651): Es la principal normativa que regula la actividad minera en Perú. Promulgada en 2001 y modificada posteriormente, establece los principios, derechos, obligaciones y normas que rigen la exploración, explotación, beneficio, transporte y comercialización de recursos minerales en el país.
  - Decreto Supremo N° 031-2010-SA: Dentro de este reglamento, se especifican diferentes parámetros de calidad, incluyendo los límites máximos permisibles para diversos contaminantes y características del agua. Ver Anexo C.

## 2.7. ANTECEDENTES

### **Antecedentes Internacionales**

León (2015), el objetivo de este estudio “Aplicación De Un Coagulante Natural Obtenido A Partir De La Penca De Tuna (*Opuntia ficus-indica*) Para La Mejora De La Calidad En Aguas De Consumo En La Localidad De Achocalla” en la Paz - Bolivia fue mejorar la calidad del agua potable en Achocalla utilizando un coagulante natural derivado de (*Opuntia ficus-indica*), como una alternativa al tratamiento convencional. Se recolectaron muestras de agua en un punto A y B, mediante la prueba de jarras, se



determinó la cantidad óptima de penca de tuna necesaria para eliminar la turbidez del agua. Los resultados mostraron que el coagulante de *Opuntia ficus-indica* fue altamente efectivo, con una remoción de turbidez promedio del 93,15% al 90,82% para las muestras A y B, respectivamente. Además, este coagulante no alteró significativamente el pH del agua tratada, manteniéndose dentro de los límites establecidos. En comparación, el sulfato de aluminio mostró una mayor remoción de turbidez, con un promedio del 96,62% y 96,05% para las muestras A y B, respectivamente, pero causó una disminución del pH por debajo de los límites aceptables. En conclusión, el coagulante de penca de tuna demostró ser una opción eficaz para reducir la turbidez del agua en comparación con el sulfato de aluminio. (León, 2015, pp. 16-157).

Bravo (2023), en su investigación titulada "Tratamiento y disposición final de desechos mineros generados en la planta de Beneficio EMINZA S.A", llevada a cabo en el cantón Santa Rosa, Provincia El Oro – Loja (Ecuador). Bravo realizó una exhaustiva caracterización de los desechos mineros. Mediante el análisis de propiedades físicas, químicas y mineralógicas, pudo determinar en los desechos una naturaleza polimetálica sulfurada, con notables concentraciones de cobre, plomo, cadmio y hierro, entre otros. Para abordar esta problemática, Bravo llevó a cabo la prueba de jarras usando diferentes polímeros, identificando así el floculante más efectivo. Los resultados revelaron que la combinación de los floculantes HARFLOC - 1140 Y HARFLOC – 1145 generó un super floculante, el cual demostró ser altamente eficaz al recuperar una notable cantidad de agua cristalina libre de sedimentos. (Bravo, 2023, p. 15).

Bravo (2017), en su proyecto de grado de modalidad monografía "Coagulantes y Floculantes Naturales en la reducción de turbidez, sólidos suspendidos, colorantes y metales pesados en aguas residuales", en la ciudad de Bogotá – Colombia. Tiene como objetivo analizar la capacidad de coagulación y floculación de metales pesados, sólidos



en suspensión, turbidez, colorantes y demanda química de oxígeno en aguas residuales. Se centra en la aplicación de métodos de extracción de origen natural usando 15 especies vegetales y 2 extractos animales, con el fin de sustituir coagulantes químicos convencionales, como el sulfato de aluminio y el cloruro férrico, en procesos de filtración de agua. La investigación, se basa en la recopilación y descripción de información bibliográfica sobre las propiedades floculantes de las especies vegetales y extractos animales seleccionados. El estudio revela que los biopolímeros obtenidos de las especies vegetales y animales analizadas demuestran una eficacia significativa en la eliminación de contaminantes, mostrando valores de eliminación comparables o superiores a los coagulantes químicos convencionales. A pesar de que algunos factores, como el pH, no afectan sustancialmente la capacidad de coagulación en ciertas especies vegetales, se destaca la necesidad de explorar y expandir la investigación a escala industrial para obtener resultados óptimos en procesos de coagulación y floculación. (Bravo, 2017, p. 8).

Guzmán (2020), en su trabajo de titulación llamado “Tratamiento de aguas de drenaje de mina mediante biocoagulación con *caeslphia spinosa* (guarango)”, tiene por objetivo evaluar la efectividad del guarango como biocoagulante, para el tratamiento de aguas en la industria minera en la ciudad de Ecuador. Para ello, se seleccionaron 3 industrias mineras, de las cuales se consideraron muestras de su drenaje minero, para así someterlos a un análisis físico-químico, luego haciendo uso del coagulante elaborado por el método SLE y MAE. Realizando un análisis sobre la eficiencia de remoción sobre cada parámetro, obteniendo como resultado para la mina 1 (SST (92%), SDT (50%), CE (51,19%), color (92,77%) y turbidez (79,59%)), mina 2 (SST (84,58%), SDT (39,48%), CE (33,75%), color (89%) y turbidez (97,70%)) y mina 3 (SST (95,33%), CE (21,95%), color (67,7%) y turbidez (91,88%)). Como conclusión que el guarango no genera cambios bruscos de pH y genera una cantidad menor de lodos residuales. (Guzmán, 2020, p. 8).



Martínez & González (2012), en su trabajo “Evaluación del poder coagulante de la tuna (*Opuntia ficus-indica*) para la remoción de turbidez y color en aguas crudas - Colombia” mediante una investigación cuantitativa experimental, se evaluó la capacidad de un polvo obtenido de la Tuna (*Opuntia ficus-indica*) para remover turbidez y color en aguas crudas. Este trabajo abarcó la elaboración del agente coagulante, determinando su densidad a granel, pH, y contenido de carbohidratos y proteínas. Las pencas de Tuna se hicieron en un polvo coagulante color marfil mediante operaciones físicas como remoción de cutícula, secado, triturado, tamizado y extracción de pigmentos. Las pruebas de jarra realizadas en los laboratorios de la Universidad de Cartagena mostraron la eficiencia del polvo, cotejar los resultados de turbidez y color con los estándares del Decreto 1575 del 2007 de Colombia. Se utilizó agua cruda del Canal del Dique, obteniendo remociones altos de turbidez y color con pequeñas dosis del coagulante. Las altas velocidades de agitación mejoraron la remoción de impurezas, mientras que las bajas velocidades generaron flóculos más grandes y compactos.

Nharingo, Zivurawa & Guyo (2015), en su artículo “Exploring the use of cactus *Opuntia ficus-indica* in the biocoagulation–flocculation of Pb (II) ions from wastewaters – Zimbabwe” estudian al cactus *Opuntia ficus-indica*, se ha explorado como un biofloculante económico, abundante y ecológico para eliminar iones de Pb (II) de soluciones acuosas. Caracterizado mediante espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), el polvo de cactus demostró la parte de varios grupos funcionales en la eliminación de estos iones. El proceso de coagulación-floculación se optimizó en términos de pH, concentración inicial de Pb (II), tamaño de partícula, dosificación, fuerza iónica, tiempo de contacto y temperatura. Los resultados mostraron que el proceso fue bueno a pH 5, con una dosificación de 8 mg/L, a 35 °C y un tiempo de sedimentación de 180 minutos. El proceso resultó ser espontáneo y endotérmico, logrando una eliminación



total de metales pesados de 100% (Pb), 85,74% (Zn), 84,16% (Cd) y 93,02% (Cu) en el agua del río Mukuvisi en Harare, Zimbabue.

Vázquez (1994), en su tesis de maestría “Extracción de coagulantes naturales del nopal y aplicación en la clarificación de aguas superficiales – México” en este estudio se utilizó un coagulante natural derivado de tres especies de *Opuntia* (nopal) para tratar muestras de agua con color y metales pesados, además de agua residual doméstica. La extracción se realizó con acetona, obteniendo un rendimiento entre 2,5% y 7,0% en base húmeda. Las pruebas indicaron la presencia de material orgánico y sales inorgánicas eficaces en la coagulación-floculación. Se lograron remociones significativas: en muestras sintéticas con color, 80% de grupos orgánicos y 40% de SST; en agua residual doméstica, el sulfato de aluminio removió 92% de turbidez y 95,6% de SST, mientras que, con alumbre y coagulante natural, la remoción de turbidez alcanzó 97,3% y de SST 95,6%. El coagulante natural solo alcanzó 58% de turbidez y 33,4% de SST con O. En la remoción de metales pesados a pH 6,5, se obtuvo 83% de plomo, 80% de hierro y 15% de zinc, y a pH 8,5, 78% de plomo, 86% de hierro y 50% de zinc.

### **Antecedentes Nacionales**

Campos & Ríos (2021), en su tesis de pregrado “Eficiencia de *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller y *Echinopsis pachanoi* en la remoción de plomo (II) de la cuenca alta del río Moche - Trujillo 2019-2020” tiene objetivo principal analizar la capacidad de las plantas de *Opuntia ficus-indica* (nopal) y *Echinopsis pachanoi* (san pedro) para eliminar el plomo (II) del río Moche. Se recolectaron muestras durante los meses de noviembre de 2019 a enero de 2020, utilizando concentraciones de plomo de 20 ppm, 30 ppm y 40 ppm. La metodología empleada fue la prueba de jarras. Se midieron las concentraciones iniciales de parámetros como el pH, la conductividad y el oxígeno disuelto utilizando





métodos electrométricos, mientras que el plomo (II) se analizó mediante espectrofotometría de absorción atómica, con un tiempo de remoción de 30 minutos. Los resultados indicaron que tanto el nopal como el san pedro actuaron como coagulantes naturales, eliminando entre el 55% y el 69% del plomo (II) en el caso del nopal, y entre el 16% y el 43% en el caso del San Pedro. Se determinó que la concentración óptima de plomo fue de 20 ppm, y se concluyó que el nopal fue más efectivo en la eliminación del plomo. (Campos & Ríos, 2021, p. 8).

Martínez & Solis (2014), en su tesis “Análisis comparativo de coagulantes, floculantes y decantación lastrada aplicados en el proceso de eliminación de agentes contaminantes en un sistema de afluentes”, tuvo como objetivo realizar un análisis comparativo y evaluar la dosis óptima de coagulante-floculante y lastre mediante prueba de jarra. Realizando monitoreos periódicos de la composición del agua que consumían los pobladores de los A.A.H.H Alto Juan XXIII en la ciudad de Arequipa, los cuales fueron analizados en laboratorio. La coagulación se llevó a cabo usando sulfato de aluminio como coagulante en su punto inicial. Para la aplicación del floculante y el lastre (sílice) se experimentó con prueba de jarras con un tiempo de retención de 2 minutos, logrando un crecimiento en el tamaño y peso del floc pasado el tiempo total de floculación. El lastre utilizado arena sílice ( $\text{SiO}_2$ ) con una malla de 60 y un tamaño de partícula de 180 – 250  $\mu\text{m}$ , presentando altos porcentajes de remoción de turbidez. Finalmente, fue posible obtener un % de Remoción de Turbidez de 95% con respecto a la turbiedad inicial, usando como dosis óptima de coagulante 50mg/L, dosis óptima de floculante 0,8 mg/L y una dosis de lastre sílice ( $\text{SiO}_2$ ) de 0,4gr/L. (Martínez & Solis, 2014, pp. 4- 97).

Oré (2014), este trabajo de investigación “Evaluación de la eficiencia de los floculantes de sulfato de aluminio y Polifloc empleado en la depuración de aguas de baja



turbiedad en la planta de tratamiento de Agua Potable Quicapata – Ayacucho”. El objetivo dado, de acuerdo al título, tiene como fin determinar la dosis adecuada para evaluar la eficiencia de los floculantes nombrados. Este estudio se da en un rango variable de turbiedad del agua, el mismo se enfoca en la temporada seca. Concluyendo así, que el sulfato de aluminio trabaja muy bien para depurar la turbiedad en un rango de 20 NTU a 200 NTU y cuando se tiene una turbiedad menor a 20 NTU es necesario usar el Polifloc, con lo cual se logra reducir la turbidez (mejorando el proceso de sedimentación). La dosis óptima de sulfato de aluminio fue de 20 mg/l a 30 mg/l, mientras que del Polifloc fue de 0,49 ppm; siendo su rango óptimo de trabajo 15 a 65 NTU, recalcando que mientras más baja la turbiedad los resultados fueron mejores. (Oré, 2014, p. 6).

Menéndez & Muñoz (2021), en su artículo “Contaminación Del Agua Y Suelo Por Los Relaves Mineros – Chiclayo” tiene como objetivo abordar y examinar los impactos derivados de la contaminación del agua y el suelo causada por los residuos de desechos mineros a nivel del territorio peruano. En estas operaciones mineras, la gestión inadecuada de los residuos de relaves conlleva en la contaminación de tanto suelos, aguas superficiales y subterráneas, afectando a los ecosistemas terrestres y marinos, así como a productos consumibles como peces y productos agrícolas. Lo que, a su vez, tiene consecuencias negativas para la salud de las comunidades cercanas a las minas. A través del análisis de 52 artículos entre 2017 y 2020 en bases de datos como Scopus y Scielo, confirmó que la contaminación del agua y el suelo debido a los desechos de relaves mineros es inevitable en estos proyectos, especialmente en términos de degradación de suelos, aguas y aire. (Menéndez & Muñoz, 2021, p. 2).

España (2022), en su tesis “Remoción de metales en efluentes de relaveras para alcanzar agua de categoría 3 de la provincia de Caravelí – Huancayo 2020” abordó la preocupación sobre los efectos adversos de los efluentes de las relaveras en el medio



ambiente y los ecosistemas debido a un tratamiento inadecuado o manejo deficiente. El objetivo fue determinar cómo la eliminación de metales de estos efluentes podría mejorar su calidad para cumplir con los estándares ambientales de categoría 3 en la provincia de Caravelí en el año 2020. Se empleó una metodología analítica deductiva en un enfoque de investigación aplicada de nivel explicativo con un diseño pre experimental. Los efluentes de las relaveras en Caravelí fueron el foco de estudio. Los resultados mostraron que los niveles iniciales de cobre, zinc y plomo en los efluentes excedían los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) de categoría 3. Mediante un proceso de neutralización con cal a un pH de 8,5, se logró reducir las concentraciones de cobre, zinc, hierro y plomo por debajo de los límites establecidos en los estándares de calidad para agua categoría 3 y los límites máximos permitidos para la descarga de efluentes líquidos de actividades minero metalúrgicas. Se concluyó que la eliminación de metales de los efluentes de las relaveras tiene un efecto significativo en la mejora de la calidad del agua para cumplir con los estándares de categoría 3 en la provincia de Caravelí en 2020. (España, 2022, p. 11).

Caparachin & Salas (2017), en su tesis “Remoción de hierro de las aguas ácidas de la mina Carhuacayán mediante el coagulante del cactáceo *Opuntia floccosa* a nivel de laboratorio – Huancayo” tiene como objetivo remover el hierro de estas aguas mediante el uso del coagulante extraído de *Opuntia floccosa*. En la parte experimental, el coagulante se obtuvo tras procesos de secado, molido, tamizado, eliminación de pigmentos y liofilización. Este coagulante se utilizó en pruebas de jarras con muestras de agua de la mina Carhuacayán, evaluando diferentes concentraciones y tiempos de coagulación. Los resultados mostraron que una concentración de 20 ppm de coagulante y un tiempo de coagulación de 5 minutos lograron una remoción de hierro del 91,729%, cumpliendo con los estándares de calidad ambiental para agua establecidos por el MINAM.



Chávez & Cholán (2018), en su estudio “Evaluación del mucílago de *Opuntia ficus-indica*” en la reducción de metales en drenaje ácido de mina de la Quebrada Honda - Colquirrumi S.A. - Cajamarca”, se evaluó la eficiencia de las cactáceas *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller “nopal” y *Echinopsis pachanoi* “san pedro” en la remoción de plomo (II) de la cuenca alta del río Moche, con muestras tomadas entre noviembre de 2019 y enero de 2020, utilizando concentraciones de 20 ppm, 30 ppm y 40 ppm y la metodología de prueba de jarras. Se midieron parámetros orgánicos (pH, conductividad y oxígeno disuelto) y el plomo (II) mediante espectrofotometría de absorción atómica, con un tiempo de remoción de 30 minutos. Los resultados mostraron que *Opuntia ficus-indica* logró una remoción de plomo del 55% al 69%, mientras que *Echinopsis pachanoi* alcanzó del 16% al 43%, determinando que la concentración óptima para ambas especies es de 20 ppm y que *Opuntia ficus-indica* es la más efectiva en la remoción de plomo.

Silva (2017), en esta investigación “Extracción del mucílago de la penca de tuna y su aplicación en el proceso de coagulación-floculación de aguas turbias - Lima” se persigue obtener altos rendimientos en la extracción del mucílago de la penca de tuna, seguido de su caracterización química y evaluación para el tratamiento de aguas turbias. Mediante un diseño factorial fraccionado, se determinaron los factores óptimos de extracción: una relación agua-penca de 4:1, temperatura de 60°C y tiempo de extracción de 2 horas, alcanzando un rendimiento máximo del 2,41%. El análisis estadístico reveló que estos factores influyen de manera inversa en el rendimiento de extracción, siendo el tiempo el más significativo. La caracterización química del mucílago mostró variaciones en humedad, proteínas, cenizas, grasas y carbohidratos, con carbohidratos destacando como el componente principal relacionado directamente con el rendimiento de extracción. En ensayos de clarificación de aguas turbias, se encontró que la concentración óptima de mucílago (30-50 ppm) logró una remoción de turbidez máxima entre 86% y



88,9%, siendo la turbidez inicial un factor determinante con correlación positiva. Estos resultados subrayan la eficacia del mucílago de tuna como agente clarificante, dependiendo de condiciones específicas de extracción y aplicación.

Villanueva (2019), en su trabajo de licenciatura “Efecto de tres concentraciones de mucílago de tuna (*Opuntia ficus-indica* (L.) Miller) y de San Pedro (*Echinopsis pachanoi* (Britton & Rose) Friedrich & G.D. Rowley) en la clarificación del agua - Cajamarca”. En este estudio se investigó el efecto de los mucílagos deshidratados de tuna (*Opuntia ficus-indica*) y San Pedro (*Echinopsis pachanoi*) en la clarificación de agua turbia, utilizando concentraciones de 0,75 g/L, 1 g/L y 1,25 g/L mediante pruebas de jarras. Se evaluaron diferentes niveles de turbiedad inicial (500 a 1000 UNT), tiempo de remoción (30 minutos) y extracción del mucílago deshidratado. Los resultados indicaron que ambos mucílagos son efectivos como clarificadores, con remociones de turbiedad entre 62% y 90% para la tuna, y entre 60% y 78% para el San Pedro. Con la tuna, la conductividad eléctrica aumentó de 170 a 710  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , y el pH disminuyó de 7,6 a 6,7; mientras que, con el San Pedro, la conductividad eléctrica aumentó de 186 a 962  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y el pH disminuyó de 7,8 a 6,1. Se determinó que la concentración óptima de ambos mucílagos es de 1,25 g/L, siendo la tuna más efectiva, lo que sugiere su potencial aplicación en el tratamiento de aguas turbias.

### **Antecedentes Locales**

Monroy (2019), en su estudio investigativo “Remoción De Plomo Pb (II) De Soluciones Acuosas Y Aguas Residuales De Mina, Por Adsorción, Floculación – Sedimentación De Flujo Ascendente Batch Utilizando Chacko (Hidralgirita) Y Cal (Cao) – Puno”, se enfoca en determinar la eliminación de plomo a través de procesos de adsorción, floculación y sedimentación utilizando arcilla chacko como adsorbente. Se



busca caracterizar las propiedades físico-químicas de este material y establecer las condiciones óptimas de pH, concentración del soluto-sorbente, tiempo de agitación, así como identificar el isoterma más adecuado para el proceso de adsorción discontinua. Se evaluó la arcilla chacko mediante difracción de rayos X, revelando su composición principal. Para la floculación-sedimentación, se utilizó cal artesanal cuyas características fueron analizadas en el laboratorio. Se determinaron las variables óptimas para la remoción de plomo y turbidez en aguas residuales de mina, empleando arcilla chacko y cal artesanal respectivamente. Se logró una alta eficiencia de remoción de plomo y turbidez utilizando los parámetros óptimos establecidos. En resumen, se alcanzó una remoción del 68,80% de plomo por adsorción y una eliminación del 89,13% de la turbidez. (Monroy, 2019, p. 18).

Tejada (2017), en su tesis de pregrado “Tratamiento y Sedimentación de la Turbidez con cal en las aguas residuales de los relaves mineros de la Unidad Operativa Minera Santiago – B” se propuso evaluar la sedimentación de sólidos totales en suspensión y reducir la turbidez de las aguas residuales procedentes de relaves mineros en la Unidad Operativa Minera Santiago – B en el paraje Vizcachani, usando cal como coagulante-floculante. Aplicando el método de test de jarras, realizó pruebas de sedimentación en aguas residuales con alta turbidez y una elevada concentración de sólidos totales en la unidad minera Santiago B. La investigación determinando la dosis optimizada de 5% de CaO, como coagulante-floculante, con una cantidad de 6 mL. Luego fue evaluada en la sedimentación del agua cruda con valores iniciales de turbidez de 81,900 NTU y sólidos totales de 67,400 mg/L. Resultando recuperar el 50.25% de agua clarificada de acuerdo al sistema de sedimentación gravimétrica en vasos precipitados de 1,000 mL en 60 minutos. Además, se redujo la turbidez a 19,39 NTU y los sólidos totales en suspensión a 18,25 mg/L en el mismo periodo. (Tejada, 2017, p. 12).



Sucaticona (2022), en su tesis “Tratamiento de aguas naturales por floculación con sales de Aluminio y floculante ayuda con harina de papa deshidratada, para remoción de turbiedad, aluminio residual y reducción del floculante - Puno”, tiene como objetivo evaluar la remoción de turbiedad y aluminio residual en aguas naturales por coagulación-floculación con sulfato de aluminio y policloruro de aluminio con adición de floculantes ayuda, harina de papa deshidratada de la especie Imilla Negra e Imilla rosada; debido a los floculantes químicos utilizados dan aluminio residual que pueden crear desórdenes epidemiológicos neurológicos, llevó a cabo la caracterización mediante difracción de rayos X de la harina de papa deshidratada (harina de chuño) de las variedades Imilla Negra (*Solanum tuberosum* ssp) y Ccompis Imilla Rosada (*Solanum tuberosum* ssp). Los resultados revelaron que la estructura molecular de la harina de papa Imilla Negra contiene un 61,87% de almidón y un 0,05% de hexacianoférrico, mientras que la harina de papa Imilla Rosada contiene un 57,77% de almidón y un 5,38% de hexacianoférrico. Componentes clave en los procesos de coagulación y floculación. Para el proceso de floculación mediante prueba de jarras, se utilizó policloruro de aluminio como floculante, logrando una remoción de turbidez del 95,91% a un pH de 7,3. Se empleó harina de papa deshidratada de las variedades Imilla Negra e Imilla Rosada como ayuda floculante, junto con aluminio residual de aguas naturales para consumo humano. (Sucaticona, 2022, p. 18).

Llampi (2022), llevó a cabo un estudio “Influencia Del Ph En La Reducción De Turbidez Con Superfloac A-110 En Aguas Residuales De Mineral Aurífero, En Minera Mosoqminas, Ananea – Región Puno” tuvo como objetivo explorar la influencia del pH y su impacto significativo en la reducción de turbidez usando Superfloc A-110 en aguas residuales de minerales auríferos, para la metodología se obtuvo muestras de agua en campo, luego llevadas al laboratorio, se realizó pruebas de optimización de dosificación



de floculante, cal y pH para hacer test de jarras. Las características físicas del agua residual incluyeron una turbidez de 9890 NTU, un pH de 9,96, una temperatura promedio de 10,9 y una concentración de sólidos sedimentables de 650 mL/L-h. Se observó efectos distintos en la turbidez a niveles de pH 5, 7 y 9 en el agua residual: para un pH de 5, la turbidez se redujo a un promedio de 1077,8 NTU, para pH 7 disminuyó a 949,7 NTU, y para pH 9, la turbidez se redujo a 827,7 NTU. Además, se evaluó el impacto del floculante Superfloc A-110 en los niveles de pH, evidenciando diferencias notables en la reducción de turbidez. A pH 5, la turbidez promedio bajo a 263,6 NTU, a pH 7 se disminuyó a 180,3 NTU, y a pH 9, la turbidez se redujo a 131,4 NTU. (Llampi, 2022, p. 14).

Ururi (2018), en su tesis titulada "Evaluación Del Proceso De Sedimentación Con Poliacrilamida Aniónica En Las Aguas Residuales Del Circuito De Pozas De La Unidad Operativa Minera Halcón De Oro – Ananea", Este estudio se enfoca en la evaluación del proceso de sedimentación en las aguas residuales del circuito de pozas, usando poliacrilamida aniónica como agente floculante. La investigación adoptó un enfoque analítico y explicativo en un diseño cuasi experimental. Se determinó la dosis óptima de poliacrilamida aniónica para las muestras M-1, M-2 y M-3, siendo 0,4 g la dosis alta para M-1 y M-2 (con una concentración diluida del 0,4% en 100 mL) y 12 mg para M-3 (con una concentración diluida del 12% en 100 mL). En consecuencia, establecer las dosis óptimas, midiendo el porcentaje de sedimentación de la turbidez y la clarificación del agua en M-2 (con una concentración inicial de turbiedad de 13,500 NTU), logrando sedimentar el 99,9% de la turbidez y clarificar un 82,0% del agua cruda, finalmente la turbidez tiene un valor de 14,5 NTU en 30 minutos, M-3 (con una concentración inicial de turbiedad de 7,960 NTU), se alcanzó una sedimentación del 99,2% de la turbidez y una clarificación del 69,0%, obteniendo una turbidez final de 61,7 NTU en 30 minutos. (Ururi, 2018, p. 11).





Apaza (2015), en su estudio investigativo “Remoción De Metales Plomo (Pb) Y Zinc (Zn) De Las Aguas Del Rio T'oro Q'ocha Por Precipitación Alcalina En La Ciudad De Juliaca” se concentra en la eliminación de metales pesados como plomo y zinc presentes en las aguas residuales del río T'oro Q'ocha, en Juliaca, los cuales exceden los límites establecidos por la normativa ambiental peruana. Se empleó el proceso de precipitación alcalina utilizando hidróxido de calcio e hidróxido de sodio. Los resultados más significativos se obtuvieron a partir de variables operativas definidas en un diseño experimental de superficie de respuesta: un pH de 9,77 para  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  y 8,92 para NaOH, una velocidad de mezcla de 40 rpm para ambos hidróxidos y un tiempo de agitación de 20 minutos para ambos. Estas condiciones lograron una eficiencia de remoción del 99,10% para Pb y 99,50% para Zn con  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , y del 98,55% para Pb y 99,06% para Zn con NaOH. Mediante el diseño experimental de superficie de respuesta y aplicando un modelo matemático de segundo orden, se determinaron los puntos óptimos para el tratamiento simultáneo de ambos metales. Para  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , se estableció un pH de 9,77, velocidad de agitación de 30 rpm y tiempo de agitación de 19,2 minutos; mientras que, para NaOH, se obtuvo un pH de 8,93, velocidad de mezcla de 30 rpm y tiempo de agitación de 19,18 minutos. La validez del modelo de regresión matemática se demostró mediante la comparación de los valores predichos y experimentales. Concluye que la metodología de superficie de respuesta fue efectiva para optimizar las condiciones de tratamiento de las aguas residuales del río T'oro Q'ocha. (Apaza, 2015, p. 10).

Mamani (2018), en su tesis titulada "Caracterización y tratamiento de efluentes de aguas ácidas en la mina La Rinconada - Puno", aborda el problema de la contaminación por aguas ácidas generadas por la actividad minera en La Rinconada, Puno, entre noviembre de 2017 y septiembre de 2018. El objetivo principal fue evaluar la caracterización y el tratamiento de estos efluentes mediante un método de neutralización-



precipitación con cal. Los ensayos realizados en el Laboratorio de Monitoreo y Evaluación Ambiental de la UNAP mostraron que, al aplicar cal, el pH del agua aumentó entre 6,5 y 8,5, con una significativa precipitación de metales pesados: hierro (93,84%), cobre (80,95%), aluminio (99,37%), zinc (86,88%), níquel (10,3%) y manganeso (95,55%). La dosis óptima de cal fue de 0,4 g por litro de agua ácida, lo que demostró que este tratamiento es efectivo para mitigar la contaminación y mejorar la calidad del agua en la zona minera. (Mamani, 2018, p. 13).



## CAPÍTULO III

### MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. UBICACIÓN DE EJECUCIÓN DEL PROYECTO

En esta presente investigación se ejecutó en la empresa LAQUAMEQ E.I.R.L., laboratorio de análisis químico ambiental que se encuentra ubicado en el departamento de Puno, provincia de San Román, distrito de Juliaca y en el Jr. Deústua N° 522 Urb. 28 de Julio.

#### 3.2. UBICACIÓN DEL PUNTO DE MUESTREO

##### 3.2.1. Ubicación política

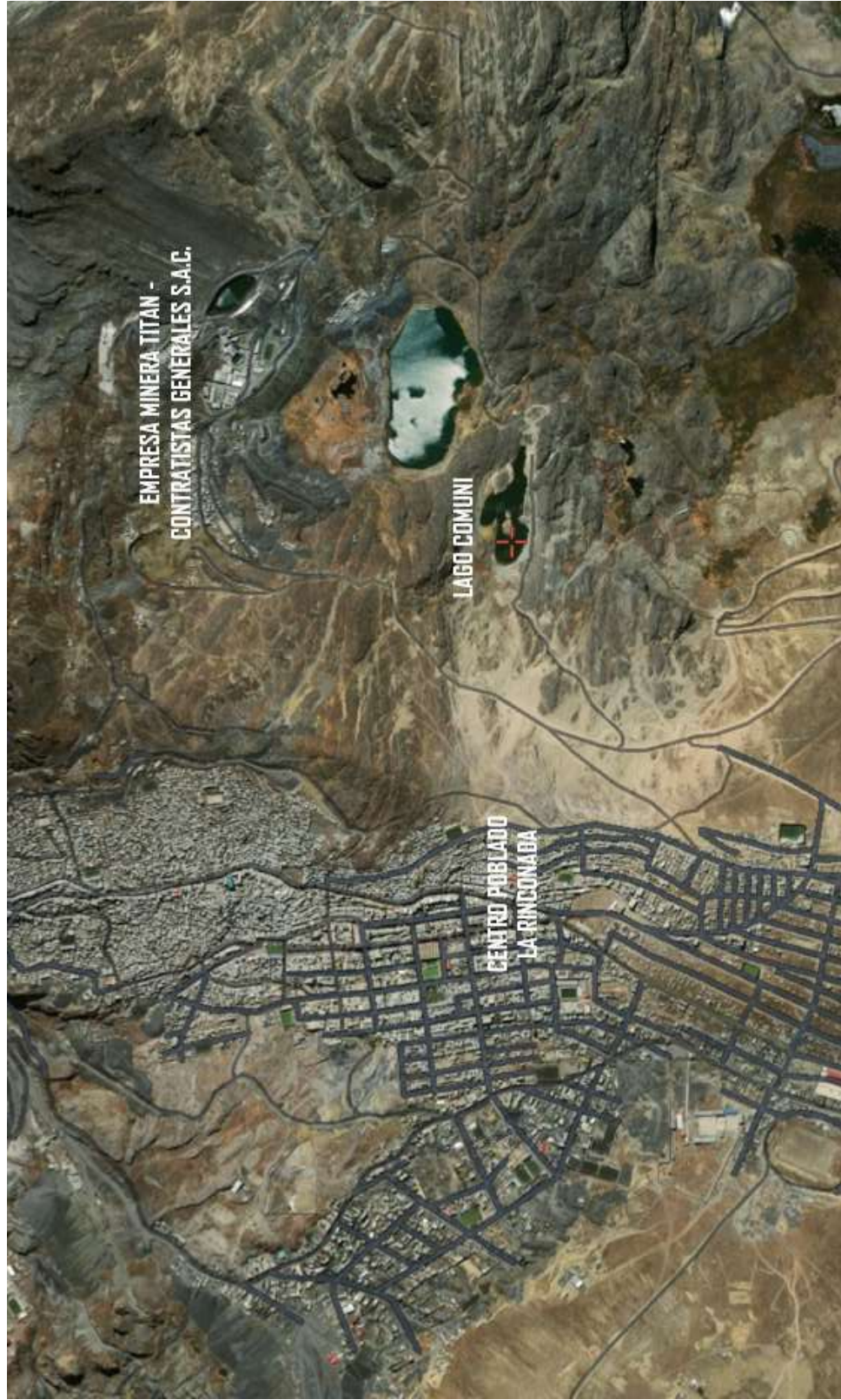
- Departamento: Puno
- Provincia: San Antonio de Putina
- Distrito: Ananea
- Centro Poblado: La Rinconada
- Lago Comuni

##### 3.2.2. Ubicación geográfica UTM

- Este: 452642,97
- Norte: 8381555,21
- Altura: 4893 m.s.n.m.

**Figura 3**

*Mapa Satelital de La Rinconada*





### 3.2.3. Accesibilidad

**Tabla 4**

*Accesibilidad al punto de muestreo*

<b>Punto de partida</b>	<b>Punto de llegada</b>	<b>Tiempo de viaje</b>	<b>Distancia</b>	<b>Medio</b>
Juliaca	Putina	1h 55 min	92 km	Terrestre
Putina	Ananea	1 h 10 min	59 km	Terrestre
Ananea	La Rinconada	30 min	14 km	Terrestre
La Rinconada	Comuni	10 min	1.8 km	Terrestre

## 3.3. POBLACIÓN Y MUESTRA

### 3.2.1. Población

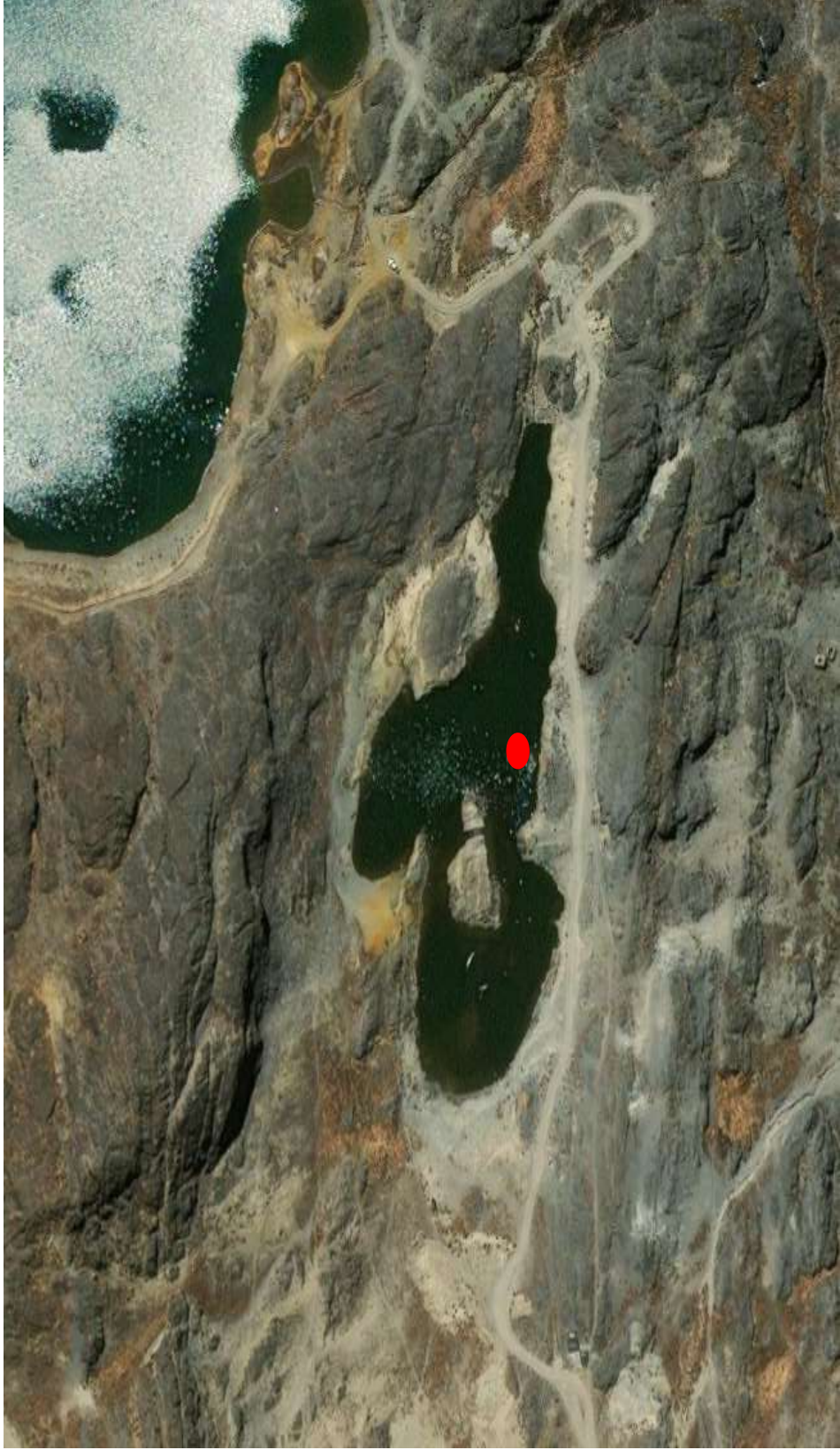
La población está constituida por el efluente del agua proveniente de la ciudad de La Rinconada y la empresa minera TITAN - Contratistas Generales S.A.C.

### 3.2.2. Muestra

La muestra de agua se recolecto en la orilla del Lago Comuni ubicado a 1,4 km de La Rinconada.

**Figura 4**

*Mapa Satelital del Lago Comuni.*





### 3.3. METODOLOGÍA

#### 3.3.1. Tipo de investigación

El tipo de investigación es experimental porque busca evaluar el impacto en una variable dentro de un proceso o estudio estadístico. Este método se caracteriza por su enfoque cuantitativo.

#### 3.3.2. Materiales, equipos y reactivos

a) Materiales de campo

- 3 Culer de plástico de 20 L, Frascos de muestreo, Pizeta de Plástico, Recipientes de plástico, Bata, Botas de seguridad, Casco, Guantes de seguridad talla L. Cámara fotográfica, GPS eTrex 20x, Lapicero.

b) Materiales de laboratorio

- Probeta de 100 mL clase A, Pipeta de 10 mL clase A, Fiolas de 50 mL clase A, 100 mL clase A, 25 mL clase A, celda de cuarzo de 10 mL, Placa petri de vidrio. Mortero de porcelana. Guantes de seguridad.

c) Equipo

- Turbidímetro Portátil EZDO TUB-430, Balanzas Analíticas y Semi Micro Solis SAB 124e- / precisión de 0,0001gr (Adam), Estufa de Extracto Sólido (EPRUS ESTUFA PIROGENOS GLP 25L), Multiparámetro portátil (HQ2200 HACH CO.), Equipo de Absorción atómica (contrAA 800 ANALYTIK JENA), Prueba de Jarras programable de 06 posiciones (PHIPPS & BIRD PB-900).

d) Reactivos



- Cal (CaO), Poliacrilamida ( $C_3H_5NO$ )<sub>(Sólido)</sub>, Penca de Tuna (*Opuntia ficus-indica* (L.) Miller) (Sólido), Solución estándar de plomo 1000 mg/L como Pb (NIST), Agua destilada.

### 3.4. MÉTODO EXPERIMENTAL

#### 3.4.1. Evaluación de los parámetros físico- químicos

- a) Toma de muestra: Se realizó un muestreo manual de manera fija donde se visualizó mayor concentración de turbidez, recolectando entonces un volumen de 60 L en 3 cooler de 20 L, con una cadena custodia y de acuerdo al Protocolo Nacional para el Monitoreo de la calidad de los Recursos Hídricos Superficiales (Resolución Jefatural N° 010-2016-ANA) para toma de muestras en ríos o lagos desde la orilla (Apartado 6.15-b). Se tomo in situ los parámetros temperatura, pH y la turbidez. La muestra fue preservada en una hielera con hielo, alcanzando una temperatura cercana a los 4°C. Seguidamente, fue transportada al laboratorio de control de calidad para su análisis.
- b) Caracterización de los parámetros físico-químicos: La medición de los parámetros iniciales del agua se realizó de la siguiente manera:
  - En la evaluación de la temperatura del agua fue in situ en el lago Comuni, se utilizó el método SM 2550 B. Primero, se preparó el equipo, asegurándose de que el Multiparámetro portátil (HQ2200 HACH CO.), estuviera debidamente calibrado. Se tomo 250 mL en un vaso precipitado. y esperando a que la lectura del equipo se estabilizara antes de registrar la temperatura. Finalmente, se anotó la temperatura.





- En la medición de pH en el agua del lago Comuni, se aplicó el método SM 4500-H. Se preparó el Multiparámetro portátil (HQ2200 HACH CO.), que incluía un electrodo de hidrógeno calibrado. Se evaluó la muestra obtenida del punto anterior. Luego, se sumergió el electrodo a la muestra, permitiendo que se estabilizara la lectura antes de registrar el valor de pH. Finalmente, se documentó el resultado.
- En la evaluación de la turbidez del agua en el lago Comuni, se utilizó el método nefelométrico SM 2130. Se preparó el Turbidímetro Portátil EZDO TUB-430. Se realizó la medición, vertiendo la muestra obtenida en el vial del turbidímetro hasta la marca de aforo, donde se midió la dispersión de luz para determinar la turbidez. Finalmente, se registró el resultado.
- En la evaluación de la concentración inicial del plomo en el agua del lago Comuni, se aplicó el método SM 3500-Pb B. Se preparó el Equipo de Absorción atómica (contraAA 800 ANALYTIK JENA) y la solución estándar de plomo  $1000 \text{ mg.L}^{-1}$  como Pb (NIST) para la curva estándar de calibración. Se realizaron las mediciones de la concentración de plomo mediante la lectura de sus absorbancias en el laboratorio.

### **3.4.2. Ensayos de coagulación-floculación**

#### **3.4.2.1. Preparación del coagulante natural**

- a) Obtención de Materia Prima: La penca de tuna - *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller utilizada en la presente investigación, se obtuvo a afueras de la ciudad de Moquegua, en donde se extrajo

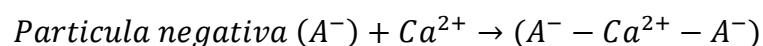


cladodios de penca de 30 cm a 40 cm y de una de edad de entre 1 a 3 años aproximadamente.

- b) Extracción del coagulante: se procede a lavar 4 cladodios, con ayuda de una espátula se retira las espinas y se corta la cutícula externa. Posteriormente se corta en prismas rectangulares de  $\pm 2$ cm y se introduce en una estufa de extracto sólido por 48 horas a una temperatura de 60 °C para eliminar la humedad. Luego se procede a triturar el peso de las muestras en un mortero y tamizarlo con una malla 40 para la obtención del polvo fino del coagulante natural. Posteriormente se colocó en 4 placas.

#### 3.4.2.2. Tratamiento en Prueba de Jarras

La metodología empleada para la presente investigación combina procesos químicos y físicos de coagulación-floculación para maximizar la eficiencia del tratamiento. Inicialmente, se añadieron 0,02 g de CaO a 1 L de agua en los beakers del test de jarras PHIPPS & BIRD PB-900, lo que provocó la formación de hidróxido de calcio ( $Ca(OH)_2$ ), según la reacción:  $CaO + H_2O \rightarrow Ca(OH)_2$ . Este compuesto incrementa el pH al rango óptimo de 8-9, favoreciendo la neutralización de partículas y la precipitación de iones de plomo ( $Pb^{2+}$ ) como hidróxido de plomo insoluble ( $Pb^{2+} + 2OH^- \rightarrow Pb(OH)_2 (s)$ ). Este ajuste de pH también facilita la coagulación al reducir la carga superficial de las partículas suspendidas.



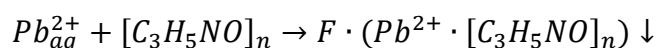
Al añadir iones como  $Ca^{2+}$  (provenientes de  $Ca(OH)_2$ ) estos interactúan con las cargas negativas de las partículas y las neutralizan,



permitiendo que las partículas se aglomeren en flóculos. En esta reacción, el ion  $Ca^{2+}$  actúa como un puente entre dos partículas con carga negativa  $A^-$  reduciendo las fuerzas de repulsión y facilitando su aglomeración (Garzón, 2021).

Posteriormente, se añadieron concentraciones de  $15 \text{ mg.L}^{-1}$ ,  $30 \text{ mg.L}^{-1}$  y  $45 \text{ mg.L}^{-1}$  de *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller un coagulante natural rico en polisacáridos y mucílagos, que actúan adsorbiendo las partículas coloidales y formando flóculos primarios. Es importante precisar que la principal acción de la penca de tuna *Opuntia ficus-indica* (L.) es como coagulante, gracias a la presencia de grupos carboxilo ( $-COOH$ ) e hidroxilo ( $-OH$ ) en los mucílagos y otros compuestos presentes en la planta. Estos grupos funcionales pueden interactuar con las partículas suspendidas y ayudar a coagularlas. Sin embargo, la presencia del grupo amido ( $-CONH_2$ ) en los polisacáridos, proteínas, alcaloides y glicoproteínas de la *Opuntia* puede conferirle algunas propiedades floculantes. El grupo amido puede interactuar con otros grupos polares presentes en las partículas suspendidas y ayudar a agruparlas, lo que es característico de la floculación (Nharingo et al, 2015).

Simultáneamente, se incorporó poliacrilamida en concentraciones de  $25 \text{ mg.L}^{-1}$ ,  $32,5 \text{ mg.L}^{-1}$  y  $40 \text{ mg.L}^{-1}$  como floculante, su efecto es unir las partículas y estabilizar los flóculos mediante la formación de puentes poliméricos.





En donde,  $F$  representa el flóculo formado por la interacción del ion plomo con el polímero de poliacrilamida  $[C_3H_5NO]_n$ , que luego sedimenta, lo cual se indica por la flecha hacia abajo  $\downarrow$  (Igañez & Hernández, 2010). La mezcla rápida a 150 rpm garantizó la dispersión uniforme del coagulante natural y el floculante, mientras que la agitación lenta a 80 rpm durante 15 minutos permitió el crecimiento de flóculos más grandes y densos. Finalmente, durante los 30 minutos de sedimentación, los flóculos densos se depositaron en el fondo del recipiente, arrastrando consigo partículas suspendidas, plomo precipitado y otros contaminantes.

Finalmente, se recolectó un volumen de 100 mL de la muestra tratada utilizando una pipeta volumétrica para garantizar precisión. La muestra se transfirió a un vaso precipitado para su análisis. La concentración residual de plomo fue determinada mediante espectrofotometría de absorción atómica utilizando un equipo calibrado, asegurando la exactitud en la detección de trazas del metal. Asimismo, la turbidez final de la muestra fue evaluada empleando un turbidímetro portátil EZDO TUB-430, siguiendo los protocolos estandarizados en el laboratorio para mediciones de calidad del agua.

### 3.4.3. Análisis de datos para demostrar la eficiencia

En el presente estudio, se aplicó la Metodología de Superficie de Respuesta (MSR) basado en el diseño de Box-Wilson para los procesos de remoción por coagulación-floculación. Según la bibliografía y las condiciones de operación, se estudiaron 3 variables principales: concentración de la penca de tuna - *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller (15 mg.L<sup>-1</sup>-45 mg.L<sup>-1</sup>) ( $x_1$ ), concentración de

poliacrilamida ( $25 \text{ mg.L}^{-1}$ - $40 \text{ mg.L}^{-1}$ ) ( $x_2$ ) y tiempo de sedimentación (10 min-30 min) ( $x_3$ ), con la finalidad de evaluar su influencia en la remoción de plomo ( $R_1$ ) y remoción de turbiedad ( $R_2$ ) de las aguas con relaves mineros del lago Comuni de La Rinconada. En la tabla 5 se presentan los valores para los tres niveles de cada variable.

**Tabla 5**

*Parámetros del proceso y sus niveles para el diseño experimental.*

Variable independiente	Rango y niveles de variables				
	-1.682	-1	0	+1	+1.682
$x_1$ : Concentración de <i>Opuntia ficus-indica</i> (L.) Miller ( $\text{mg.L}^{-1}$ )	4.77	15.00	30.00	45.00	55.23
$x_2$ : Concentración de poliacrilamida ( $\text{mg.L}^{-1}$ )	19.87	25.00	32.50	40.00	45.11
$x_3$ : Tiempo de sedimentación (min)	3.18	10.00	20.00	30.00	36.82

Los niveles superiores e inferiores de las variables independientes de la tabla 5 fueron establecidos según los resultados de los ensayos preliminares del proceso de coagulación-floculación realizadas en un equipo de prueba de jarras para la remoción de plomo y turbiedad de las aguas con relaves mineros.

El diseño de Box-Wilson al ser un diseño compuesto central rotacional, incluyen los llamados puntos de estrella ( $\alpha$ ) cumpliendo la siguiente igualdad (Lazic, 2006):

$$\alpha = 2^{\frac{k}{4}} \quad (1)$$

Donde k es el número de variables utilizadas en el diseño experimental compuesto. En este estudio se evaluaron 3 variables, entonces el valor de  $\alpha$  fue:



$$\alpha = 2^{\frac{3}{4}} = 1,682 \quad (2)$$

El número total de experimentos (N) para el diseño de Box-Wilson se determinó con la siguiente ecuación (Ayala y Pardo, 1995):

$$N = 2^k + 2k + n_0 \quad (3)$$

Donde  $k$  es el número de variables y  $n_0$  es el número de puntos centrales. El primer término de la derecha representa el número de términos del diseño factorial básico y  $2k$  es el número de puntos de estrella. Para 3 variables ( $k = 3$ ) y 3 réplicas en el punto central ( $n_0 = 3$ ), el número total de experimentos según la ecuación (3) fue:

$$N = 2^3 + 2(3) + 3 = 17 \text{ experimentos} \quad (4)$$

Entonces en el diseño de Box-Wilson tendremos un total de 17 experimentos, incluyendo  $2^3 = 8$  puntos cúbicos, 6 puntos axiales y 3 réplicas en el punto central. Las variables del proceso se codificaron como -1,682, -1, 0, +1, +1,682 utilizando la siguiente ecuación:

$$x_i = \frac{X_i - X_{i0}}{\Delta X} \quad (5)$$

Donde  $x_i$  es el valor codificado de la variable independiente,  $X_i$  es el valor natural de la variable independiente,  $X_{i0}$  es el valor de la variable independiente en el punto central y  $\Delta X$  es el valor de cambio de la variable independiente.

Las variables de estudio como la concentración de *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller ( $C_o$ ), concentración de poliacrilamida ( $C_p$ ) y tiempo de sedimentación ( $t$ ) se codificaron según la ecuación (5):

$$x_1 = \frac{Co - 30}{15} \quad x_2 = \frac{Cp - 32,5}{7,5} \quad x_3 = \frac{t - 20}{10} \quad (6)$$

La matriz del diseño Box-Wilson en función de las variables naturales y codificadas se muestran en la tabla 6.

**Tabla 6**

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

N°	Valores naturales			Valores codificados			Y <sub>1</sub> (% R <sub>1</sub> )	Y <sub>2</sub> (% R <sub>2</sub> )
	Conc. de <i>Opuntia ficus-indica</i> (L.) Miller (mg.L <sup>-1</sup> ) (Co)	Conc. de poliacrilamida (mg.L <sup>-1</sup> ) (Cp)	Tiempo de sedimentación (min) (t)	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>3</sub>		
1	15	25	10	-1	-1	-1	Y <sub>i</sub>	Y <sub>i</sub>
2	45	25	10	1	-1	-1	Y <sub>ii</sub>	Y <sub>ii</sub>
3	15	40	10	-1	1	-1	.	.
4	45	40	10	1	1	-1	.	.
5	15	25	30	-1	-1	1	.	.
6	45	25	30	1	-1	1	.	.
7	15	40	30	-1	1	1	.	.
8	45	40	30	1	1	1	.	.
9	4.770	32.5	20	-1.682	0	0	.	.
10	55.230	32.5	20	1.682	0	0	.	.
11	30	19.87	20	0	-1.682	0	.	.
12	30	45.110	20	0	1.682	0	.	.
13	30	32.5	3.18	0	0	-1.682	.	.
14	30	32.5	36.82	0	0	1.682	.	.
15	30	32.5	20	0	0	0	.	.
16	30	32.5	20	0	0	0	Y <sub>n-1</sub>	Y <sub>n-1</sub>
17	30	32.5	20	0	0	0	Y <sub>n</sub>	Y <sub>n</sub>

### 3.4.3.1. Estimación del efecto de las variables

Para la estimación cuantitativamente de cuanto afectan las variables sobre la remoción de plomo y la remoción de turbiedad el

proceso de coagulación-floculación se realizó utilizando el software estadístico Statgraphics Centurion XVI versión de prueba.

#### **3.4.3.1.1. Determinación del porcentaje de remoción de plomo y turbidez**

Los resultados experimentales del proceso de coagulación-floculación basadas en el diseño de Box-Wilson para la remoción de plomo y turbiedad de las aguas con relaves mineros se calcularon mediante las siguientes formulas:

$$\%R_1 = \left( \frac{C_0 - C_f}{C_0} \right) \times 100 \quad \text{y} \quad (7)$$

$$\%R_2 = \left( \frac{T_0 - T_f}{T_0} \right) \times 100$$

Donde  $\%R_1$  es el porcentaje de remoción de plomo,  $C_0$  y  $C_f$  es la concentración inicial de plomo en el agua sin tratamiento y después del tratamiento en  $\text{mg.L}^{-1}$  respectivamente. Así mismo,  $\%R_2$  es el porcentaje de remoción de turbiedad,  $T_0$  y  $T_f$  es la turbiedad inicial del agua antes del tratamiento y después del tratamiento en NTU respectivamente.

#### **3.4.3.1.2. Ajuste a un modelo de regresión**

El diseño de Box-Wilson permite estimar modelos de segundo orden para el estudio de los efectos lineales, efector de interacción y efectos cuadráticos. El modelo cuadrático o de segundo orden fue la siguiente:



$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{j=2}^k \sum_{i=1}^{j-1} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (8)$$

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.

En el sistema de tratamiento en el que intervienen 3 variables independientes  $x_1, x_2, x_3$ ; la relación matemática de la respuesta sobre estas variables puede aproximarse mediante la ecuación polinómica de segundo grado:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 + \beta_{33} x_3^2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{13} x_1 x_3 + \beta_{23} x_2 x_3 + \varepsilon \quad (9)$$

Los datos experimentales se analizaron utilizando el software estadístico Design Expert 7 versión de prueba.

#### 3.4.3.1.3. Análisis de varianza

Para probar la significancia de los efectos e interacciones se realiza el análisis de varianza como una herramienta muy útil de la inferencia estadística.

**Tabla 7**

*Análisis de varianza del modelo de segundo orden.*

Fuente	Suma de cuadrados (SC)	Grados de libertad (GL)	Cuadrado medio (CM)	F-valor	p-valor	
Modelo	$SC_M$	9	$CM_M$	$CM_M / CM_R$		
$x_1$	$SC_{x_1}$	1	$CM_{x_1}$	$CM_{x_1} / CM_R$		
$x_2$	$SC_{x_2}$	1	$CM_{x_2}$	$CM_{x_2} / CM_R$		
$x_3$	$SC_{x_3}$	1	$CM_{x_3}$	$CM_{x_3} / CM_R$		
$x_1 x_2$	$SC_{x_1 x_2}$	1	$CM_{x_1 x_2}$	$CM_{x_1 x_2} / CM_R$	F-valor > Ftabla	
$x_1 x_3$	$SC_{x_1 x_3}$	1	$CM_{x_1 x_3}$	$CM_{x_1 x_3} / CM_R$		
$x_2 x_3$	$SC_{x_2 x_3}$	1	$CM_{x_2 x_3}$	$CM_{x_2 x_3} / CM_R$		
$x_1^2$	$SC_{x_1^2}$	1	$CM_{x_1^2}$	$CM_{x_1^2} / CM_R$		
$x_2^2$	$SC_{x_2^2}$	1	$CM_{x_2^2}$	$CM_{x_2^2} / CM_R$		
$x_3^2$	$SC_{x_3^2}$	1	$CM_{x_3^2}$	$CM_{x_3^2} / CM_R$		
Residual	$SC_R$	$N - 10$	$CM_R$			
Falta de ajuste	$SC_{FA}$	5	$CM_{FA}$	$CM_{FA} / CM_R$		F-valor < Ftabla
Error puro	$SC_{EP}$	2	$CM_{EP}$			
Total	$SC_T$	$N - 1$				

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

Para el análisis de la superficie de respuesta se utilizó el software estadístico Design-Expert 7 versión de prueba con el que se elaboraron gráficas de superficie de respuesta, mapas de contorno para las diferentes combinaciones de variables independientes.

#### 3.4.3.1.5. Localización del punto estacionario

Para estimar que condiciones o valores de  $x_1, x_2, \dots, x_k$  maximizan la respuesta  $y$ , se realizó diferenciando la función respuesta en función de  $x$  e igualando a cero (Montgomery, 2004).



$$\frac{\partial Y}{\partial x_1} = \frac{\partial Y}{\partial x_2} = \dots = \frac{\partial Y}{\partial x_k} = 0 \quad (10)$$

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1. CARACTERÍSTICAS FÍSICOQUÍMICAS DE LAS AGUAS DEL LAGO COMUNI

En la tabla 8 se observan los datos hallados de los 4 parámetros esenciales en este trabajo de investigación, los cuales son:

**Tabla 8**

*Caracterización de los Parámetros Físicoquímicos evaluados en el Lago Comuni.*

Parámetro	Unidad	Método	PMA-01
Temperatura	°C	SM-2550 B Método de laboratorio de campo	14,3
Potencial de hidrógeno	Unidad de pH	SM 4500 – H	6,48
Turbidez	NTU	SM 2130 Método nefelométrico	364
Plomo	mg.L <sup>-1</sup>	SM 3500 – Pb B Método espectrofotométrico de absorción atómica.	0,0278

Los valores obtenidos en el análisis de agua, presentados en la tabla 8, revelan varias preocupaciones significativas. La temperatura de 14,3 °C es adecuada para la mayoría de los ecosistemas acuáticos; sin embargo, el pH de 6,48 indica una ligera acidez que, aunque no es crítica, afecta negativamente a los organismos acuáticos. La turbidez, con un valor de 364 NTU, es excepcionalmente alta, lo que significa una elevada concentración de partículas suspendidas que interfieren con procesos ecológicos como la fotosíntesis, lo que podría deteriorar la calidad del agua. La concentración de plomo de 0,0278 mg.L<sup>-1</sup> excede los límites establecidos para agua potable el cual es 0,01 ppm, lo



que representa un riesgo significativo para la salud humana y evidencia una contaminación por metales pesados. Estos resultados apuntan a una contaminación considerable en la fuente de agua analizada.

## **4.2. EFECTO DE LAS VARIABLES PARA LA REMOCIÓN DE PLOMO Y TURBIDEZ**

### **4.2.1. Influencia del pH**

El pH se ajusta en la muestra para el proceso de coagulación y floculación con poliacrilamida y polvo de *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller porque ambos materiales dependen del pH para funcionar de manera óptima. La poliacrilamida, como floculante, puede ver alterada su estructura y capacidad de aglomerar partículas fuera de un rango de pH adecuado, mientras que el polvo de nopal, que contiene mucílago y otros compuestos, también interactúa mejor con las partículas suspendidas en un pH específico, favoreciendo la formación de flóculos.

El estudio de Vázquez (1994) revela que el coagulante natural derivado de *Opuntia* (nopal) tiene un potencial significativo en la clarificación de aguas, mostrando buenos resultados en la remoción de turbidez, sólidos suspendidos totales (SST) y metales pesados, aunque con rendimientos menores en comparación con coagulantes convencionales como el sulfato de aluminio y el alumbre. En cuanto al pH, las pruebas realizadas en el estudio indican que la remoción de metales pesados fue mayor a un pH de 8,5, con eficiencias de remoción de plomo, hierro y zinc que variaron entre 78% y 86%. A pH 6,5, los rendimientos fueron más bajos, particularmente para el zinc (15%), pero aún efectivos para plomo y hierro.

**Tabla 9**

*Efecto del pH en la Remoción de Plomo y Turbidez en el Proceso de Coagulación-Floculación.*

N°	Temperatura (°C)	pH	Plomo final (mg.L <sup>-1</sup> )	Turbidez final (NTU)
1	13,4	8,6	0,0149	178,65
2	13,1	8,8	0,0115	89,51
3	13,4	8,9	0,0099	117,64
4	13,2	9,2	0,0071	43,21
5	13,5	8,8	0,0080	105,60
6	13,4	9,5	0,0036	41,50
7	13,3	8,6	0,0071	46,96
8	13,5	9,2	0,0010	2,80
9	13,5	8,8	0,0123	137,19
10	13,6	8,7	0,0045	42,99
11	13,7	9,0	0,0107	118,37
12	13,6	8,8	0,0063	26,57
13	13,8	9,1	0,0132	120,81
14	13,7	9,0	0,0028	26,43
15	13,8	9,3	0,0045	28,68
16	13,8	8,7	0,0050	27,45
17	13,6	8,9	0,0045	24,75

En la tabla 9 se observa que un pH más alto favorece una mayor remoción de plomo y turbidez, lo que sugiere que el pH es un factor crucial en la eficacia de la coagulación-floculación. Cuando el pH se incrementa de 8,6 a 9,5, la concentración final de plomo disminuye significativamente de 0,0149 mg.L<sup>-1</sup> a 0,0036 mg.L<sup>-1</sup> (con turbidez final reducida de 178,65 NTU a 41,50 NTU). Este comportamiento sugiere que un pH más alto facilita la formación de flóculos más densos y estables, mejorando la remoción del plomo y la reducción de la turbidez.

Asimismo, el pH parece influir positivamente en la turbidez final. En los casos en los que el pH es más alto (9,2 a 9,5), como en los experimentos 4, 6 y 8, la turbidez final muestra una notable reducción. En el experimento con pH 9,2, la turbidez final es de 2,80 NTU, con la menor concentración de plomo de 0,0010



mg.L<sup>-1</sup>. Este resultado subraya que el aumento del pH puede mejorar tanto la sedimentación de los flóculos como su capacidad para capturar partículas suspendidas, lo que resulta en un agua más clara y libre de metales pesados.

En la tabla 9 y el estudio de Nharingo et al. (2015) destacan la influencia determinante del pH en la eficacia del proceso de coagulación-floculación para la remoción de plomo (Pb(II)) y turbidez, aunque los valores óptimos difieren según el sistema y las condiciones experimentales. En el estudio de Nharingo, el pH óptimo fue 5, donde los grupos funcionales del biopolímero en *Opuntia ficus-indica* (carboxílicos, hidroxilos y aminas) lograron una neutralización de carga eficiente y formación de flóculos mediante adsorción y mecanismos puente. En contraste, el análisis de la tabla 9 muestra que un pH cercano a 9 mejora la remoción de Pb(II) (de 0.0149 mg.L<sup>-1</sup> a 0.0010 mg.L<sup>-1</sup>) y la turbidez (reducción a 2.80 NTU), probablemente debido a la precipitación de Pb(OH)<sub>2</sub>, un proceso termodinámicamente favorecido a pH alcalino. Este ajuste también favorece la formación de flóculos más densos y estables, maximizando la captura de partículas suspendidas. Las diferencias observadas pueden atribuirse a la composición química del agua a tratar y los agentes floculantes empleados, lo que resalta que la optimización del pH debe ajustarse a las características específicas del sistema tratado.

#### **4.2.2. Efecto de las variables en la remoción de plomo**

En la tabla 10 se presentan los resultados de la remoción de plomo logrado en las aguas con relaves mineros provenientes del lago Comuni de La Rinconada. Para obtener estos resultados se aplicó la Metodología de Superficie de Respuesta

(MSR) basado en el diseño de Box-Wilson para los procesos de remoción por coagulación-floculación.

**Tabla 10**

*Remoción de plomo de las aguas con relave minero del lago Comuni de La Rinconada.*

N°	Concentración de <i>Opuntia ficus-indica</i> (L.) Miller, $C_0$ (mg.L <sup>-1</sup> )	Concentración de poliacrilamida, $C_p$ (mg.L <sup>-1</sup> )	Tiempo de sedimentación, $t$ (min)	$C_0$ (mg.L <sup>-1</sup> )	$C_f$ (mg.L <sup>-1</sup> )
1	15	25	10	0,0278	0,0149
2	45	25	10	0,0278	0,0115
3	15	40	10	0,0278	0,0099
4	45	40	10	0,0278	0,0071
5	15	25	30	0,0278	0,0080
6	45	25	30	0,0278	0,0036
7	15	40	30	0,0278	0,0071
8	45	40	30	0,0278	0,0010
9	4,77	32,5	20	0,0278	0,0123
10	55,23	32,5	20	0,0278	0,0045
11	30	19,87	20	0,0278	0,0107
12	30	45,11	20	0,0278	0,0063
13	30	32,5	3,18	0,0278	0,0132
14	30	32,5	36,82	0,0278	0,0028
15	30	32,5	20	0,0278	0,0045
16	30	32,5	20	0,0278	0,0050
17	15	40	10	0,0278	0,0045

En la tabla 10, muestra un análisis de remoción de plomo de 0,0278 mg, L<sup>-1</sup> en función de la concentración de concentración de *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller, concentración de poliacrilamida y tiempo de sedimentación, Incrementar concentración *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller y poliacrilamida mejora la remoción; como para un tiempo de sedimentación de 10 minutos y una concentración de poliacrilamida igual a 25 mg.L<sup>-1</sup>, la remoción aumenta de 46.4 % (con una concentración de *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller igual a 15 mg.L<sup>-1</sup>) a 58.6 % (con una concentración de *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller igual a 45





mg.L<sup>-1</sup>). También, un mayor tiempo de sedimentación mejora la eficiencia: con una concentración de *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller igual a 15 mg.L<sup>-1</sup> y una concentración de poliacrilamida igual a 25 mg.L<sup>-1</sup>, la remoción sube de 46.4 % (con un tiempo de sedimentación de 10 min) a 71.2 % (con un tiempo de sedimentación de 30 min). La mejor condición es una concentración de *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller igual a 45 mg.L<sup>-1</sup>, una concentración de poliacrilamida igual a 40 mg.L<sup>-1</sup> y un tiempo de sedimentación de 30 min, logrando una remoción del 96.4 % (con una concentración final de plomo igual a 0.0010 mg.L<sup>-1</sup>). Esto resalta la influencia de dosis óptimas y tiempo adecuado para maximizar la remoción de plomo.

**Tabla 11**

*Porcentajes de remoción de plomo de las aguas con relave minero del lago Comuni de La Rinconada.*

N°	Concentración de <i>Opuntia ficus-indica</i> (L.) Miller, Co (mg.L <sup>-1</sup> )	Concentración de poliacrilamida, Cp (mg.L <sup>-1</sup> )	Tiempo de sedimentación, t (min)	Remoción de plomo (%R <sub>1</sub> )
1	15	25	10	46,40
2	45	25	10	58,63
3	15	40	10	64,39
4	45	40	10	74,46
5	15	25	30	71,22
6	45	25	30	87,05
7	15	40	30	74,46
8	45	40	30	96,40
9	4,77	32,5	20	55,76
10	55,23	32,5	20	83,81
11	30	19,87	20	61,51
12	30	45,11	20	77,34
13	30	32,5	3,18	52,52
14	30	32,5	36,82	89,93
15	30	32,5	20	83,81
16	30	32,5	20	82,05
17	15	40	10	83,81



En la tabla 11 se muestran una mayor remoción de plomo del 96,40% (0,0010 mg. L<sup>-1</sup>) a una concentración de *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller de 45 mg. L<sup>-1</sup>, concentración de poliacrilamida de 40 mg. L<sup>-1</sup> y un tiempo de sedimentación de 30 minutos en el experimento N° 8, mientras que los valores mínimos de remoción de plomo fue del 46,40% (0,0149 mg. L<sup>-1</sup>) obteniéndose similarmente con combinaciones de las variables con concentración de *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller de 15 mg. L<sup>-1</sup>, concentración de poliacrilamida de 25 mg. L<sup>-1</sup> y tiempo de sedimentación de 10 minutos en el experimento N° 1. La concentración inicial de plomo en las aguas fue de 0,0278 mg. L<sup>-1</sup>. Los valores de concentración de plomo luego del tratamiento por coagulación y floculación con *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller y poliacrilamida, se encuentran por debajo de la concentración de plomo (0,010 mg. L<sup>-1</sup>) del establecido por los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) Categoría 3: Riego y bebida de animales.

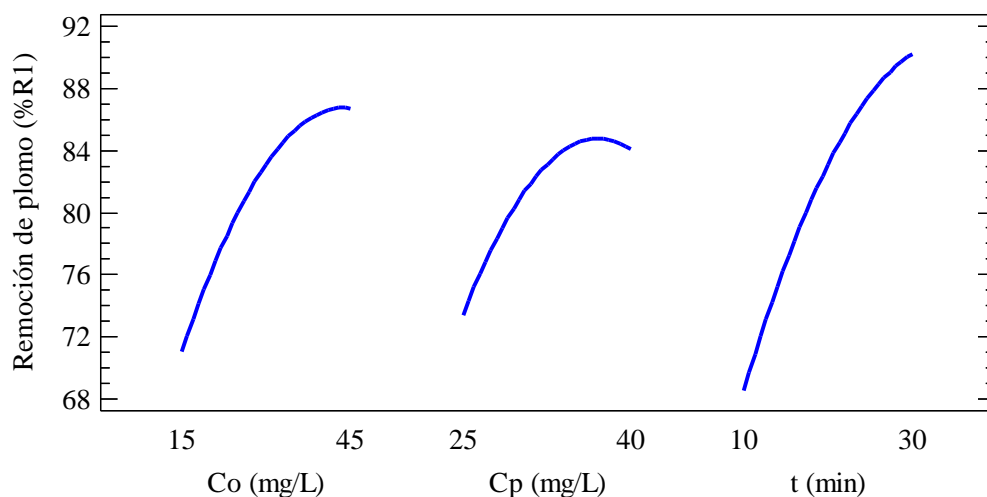
Los resultados de remoción de plomo en nuestros experimentos de coagulación y floculación con *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller y poliacrilamida fueron superiores a los obtenidos por Campos y Ríos (2021) para la remoción de plomo de las aguas de la cuenca alta del río Moche en Trujillo utilizando como coagulante *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller “nopal” mediante la metodología de prueba de jarras. Los resultados de remoción de plomo fueron del 55% y 69% para una dosis de coagulante de 20 mg. L<sup>-1</sup>, tiempo de remoción de 30 min y concentraciones iniciales de plomo en el rango de 0,36 mg.L<sup>-1</sup> a 0,46 mg.L<sup>-1</sup> siendo el tratamiento óptimo para la reducción de metales mas no para la reducción de pH sugiriendo realizar un pre-tratamiento con cal para aumentar el pH de las aguas. Según Silva (2017) indica que la *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller tiene

propiedades viscosificantes, gelificantes y formadoras de películas de gran potencial para su uso en las industria alimentaria, cosmética, farmacéutica y textil.

En la figura 5 se ilustra el efecto de las variables como la concentración de la penca de tuna (*Opuntia ficus-indica* (L.) Miller) ( $C_o$ ), concentración de poliacrilamida ( $C_p$ ) y tiempo de sedimentación ( $t$ ) para la remoción de plomo.

### Figura 5

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



Según la figura 5, cuando la concentración de *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller está en su nivel bajo ( $15 \text{ mg.L}^{-1}$ ) el valor de la remoción de plomo es del 72,0% ( $0,0078 \text{ mg.L}^{-1}$ ), mientras que está en su nivel alto ( $45 \text{ mg.L}^{-1}$ ), el valor es del 87,5% ( $0,0035 \text{ mg.L}^{-1}$ ). En relación a la concentración de poliacrilamida en su nivel bajo ( $25 \text{ mg.L}^{-1}$ ) obtenemos una remoción de plomo del 74,6% ( $0,0071 \text{ mg.L}^{-1}$ ), cuando está en su nivel alto ( $40 \text{ mg.L}^{-1}$ ), la remoción es del 85,0% ( $0,0042 \text{ mg.L}^{-1}$ ). En cuanto al tiempo de sedimentación, en su nivel bajo (10 min) la remoción de plomo es del 69,5% ( $0,0085 \text{ mg.L}^{-1}$ ) y en su nivel alto (30 min) la remoción de plomo es del 91,4% ( $0,0024 \text{ mg.L}^{-1}$ ).

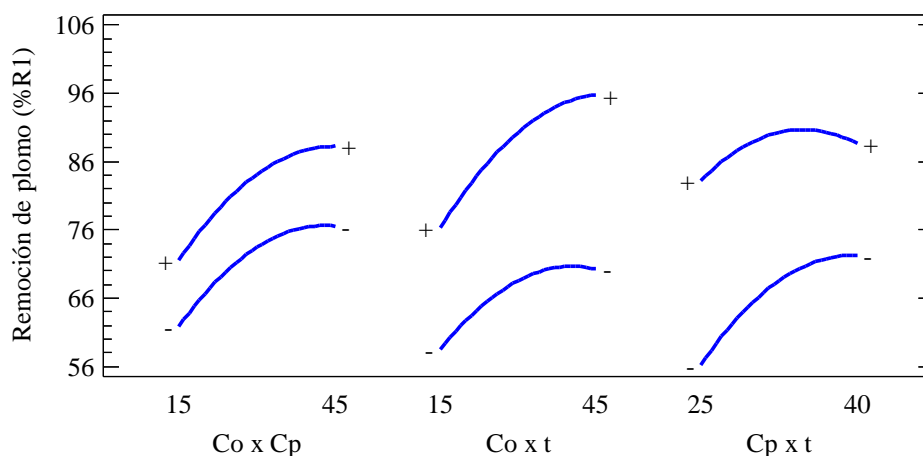
Por otro lado, Apaza (2015) utilizaron distintas concentraciones de hidróxido de calcio e hidróxido de sodio para establecer el pH durante el tratamiento de las aguas residuales donde no hubo diferencias significativas en las remociones porcentuales de plomo. Así mismo, Monroy (2019) reportó remociones de plomo de las aguas residuales del 50,83% a 84,83% con concentraciones de coagulante de 10 a 100 g.L<sup>-1</sup> respectivamente.

Así mismo, España (2022) utilizó dosis de cal como agente coagulante de 0,90 g.L<sup>-1</sup> a 1,35 g.L<sup>-1</sup> para la remoción de plomo del 38% a 51% respectivamente mostrando diferencias importantes en los resultados. También, Campos y Ríos (2021), reportaron que las remociones de plomo de las aguas residuales del 55,72% para una concentración de coagulante (*Opuntia ficus-indica* (L.) Miller) de 20 mg.L<sup>-1</sup> y del 36,30% para 40 mg.L<sup>-1</sup> existiendo diferencias significativas en los resultados.

En la figura 6 se ilustra el gráfico de interacciones de las variables como la concentración de *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller (Co), concentración de poliacrilamida (Cp) y tiempo de sedimentación (t) para la remoción de plomo.

**Figura 6**

*Gráfico de interacción para la remoción de plomo.*





Según Montgomery (2004), 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 del otro y cuando existe interacción las líneas de respuesta no son paralelas. En la figura 6 se observa que no hay interacción entre las variables concentración de penca de tuna - *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller - concentración de poliacrilamida. Mientras que existe interacción entre la concentración de *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller - tiempo de sedimentación y concentración de poliacrilamida - tiempo de sedimentación.

#### **4.2.3. Efecto de las variables en la remoción de turbiedad**

Los resultados de la remoción de turbiedad de las aguas con relaves mineros provenientes del lago Comuni de La Rinconada aplicando la Metodología de Superficie de Respuesta (MSR) según en el diseño de Box-Wilson para los procesos de remoción por coagulación-floculación se reportan en la tabla 12.

**Tabla 12***Remoción de turbiedad de las aguas con relave minero del lago Comuni de La**Rinconada*

Nº	Concentración de <i>Opuntia ficus-indica</i> (L.) Miller, Co (mg.L <sup>-1</sup> )	Concentración de poliacrilamida, Cp (mg.L <sup>-1</sup> )	Tiempo de sedimentación, t (min)	Turbiedad inicial T <sub>0</sub> (NTU)	Turbiedad final T <sub>f</sub> (NTU)
1	15	25	10	364	178,65
2	45	25	10	364	89,51
3	15	40	10	364	117,64
4	45	40	10	364	43,21
5	15	25	30	364	105,60
6	45	25	30	364	41,50
7	15	40	30	364	46,96
8	45	40	30	364	2,80
9	4,77	32,5	20	364	137,19
10	55,23	32,5	20	364	42,99
11	30	19,87	20	364	118,37
12	30	45,11	20	364	26,57
13	30	32,5	3,18	364	120,81
14	30	32,5	36,82	364	26,43
15	30	32,5	20	364	28,68
16	30	32,5	20	364	27,45
17	30	32,5	20	364	24,75

Los resultados obtenidos de la tabla 12 demuestran que el uso combinado *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller y poliacrilamida es altamente eficaz para reducir la turbiedad inicial de 364 NTU. Las variables estudiadas: concentración de coagulante, concentración de poliacrilamida y tiempo de sedimentación; muestran un efecto significativo en la eficiencia del proceso. Incrementar las concentraciones de ambos componentes mejora la remoción de turbidez, como se observa al aumentar la concentración de *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller de 15 mg.L<sup>-1</sup> a 45 mg.L<sup>-1</sup>, con una concentración fija de poliacrilamida de 25 mg.L<sup>-1</sup> y un tiempo de sedimentación de 10 min, lo que reduce la turbiedad final de 178.65 NTU a 89.51 NTU. Esto sugiere que dosis más altas favorecen la neutralización de cargas y la formación de flóculos más grandes y densos. El tiempo de

sedimentación también juega un papel crítico, ya que períodos más prolongados permiten una mayor estabilización y sedimentación de los flóculos, posiblemente debido a la sinergia entre ambos agentes coagulantes y floculante.

**Tabla 13**

*Porcentajes de remoción de turbiedad de las aguas con relave minero del lago*

*Comuni de La Rinconada.*

N°	Concentración de <i>Opuntia ficus-indica</i> (L.) Miller, Co (mg.L <sup>-1</sup> )	Concentración de poliacrilamida, Cp (mg.L <sup>-1</sup> )	Tiempo de sedimentación, t (min)	Remoción de turbiedad (%R <sub>2</sub> )
1	15	25	10	50,92
2	45	25	10	75,41
3	15	40	10	67,68
4	45	40	10	88,13
5	15	25	30	70,99
6	45	25	30	88,60
7	15	40	30	87,10
8	45	40	30	99,23
9	4,77	32,5	20	62,31
10	55,23	32,5	20	88,19
11	30	19,87	20	67,48
12	30	45,11	20	92,70
13	30	32,5	3,18	66,81
14	30	32,5	36,82	92,74
15	30	32,5	20	92,12
16	30	32,5	20	92,46
17	30	32,5	20	93,20

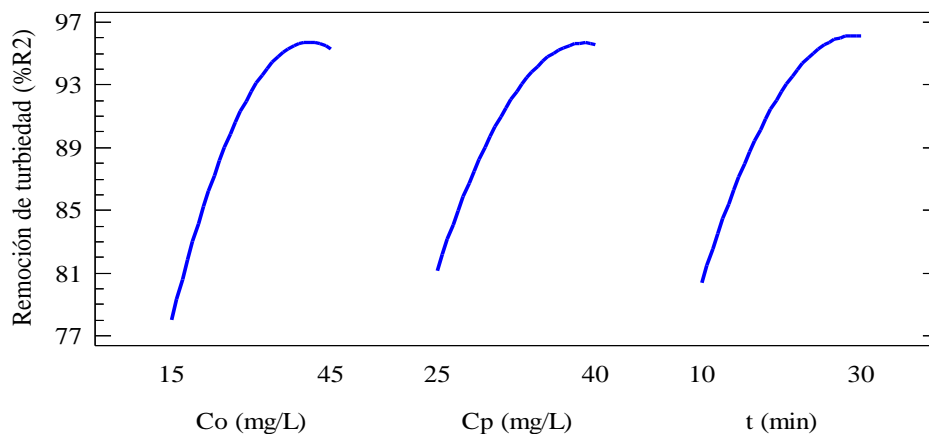
Según la tabla 13 la mayor remoción de turbiedad fue del 99,23% (2,80 NTU) con una concentración de *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller de 45 mg.L<sup>-1</sup>, concentración de poliacrilamida de 40 mg.L<sup>-1</sup> y tiempo de sedimentación de 30 minutos (N° 8). Este resultado se encuentra por debajo 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. La menor remoción de turbiedad fue del 50,92% (178,65 NTU) se alcanzó con una concentración de *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller de 15 mg.L<sup>-1</sup>, concentración de poliacrilamida de 25 mg.L<sup>-1</sup> y tiempo de sedimentación de 10 minutos en el experimento N° 1. La turbiedad inicial del agua tratada fue de 364 NTU. Nuestros resultados fueron similares al reportado por León (2015) que consistió en la aplicación de un coagulante natural obtenido a partir de la penca de tuna (*Opuntia ficus-indica*) para la mejora de la calidad en aguas de consumo en Achocalla La Paz-Bolivia, la dosis de coagulante utilizada fue de 5 mg.L<sup>-1</sup>, velocidad de agitación de 30 rpm y tiempo de sedimentación de 15 minutos para una remoción de la turbiedad del 93,15%.

En la figura 7 se muestra el efecto de las variables como la concentración de *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller (Co), concentración de poliacrilamida (Cp) y tiempo de sedimentación (t) para la remoción de turbiedad.

### Figura 7

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



La figura 7 ilustra el significado gráfico del efecto de las variables *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller, concentración de poliacrilamida y tiempo de sedimentación sobre la remoción de la turbiedad. Se observa que si en lugar de





utilizar una concentración de *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller  $15 \text{ mg.L}^{-1}$  se usa una concentración de  $45 \text{ mg.L}^{-1}$ , la remoción de turbiedad se incrementa del 78,0% (80,08 NTU) a 95,0% (18,20 NTU) respectivamente. Si se emplea una concentración de poliacrilamida de  $25 \text{ mg.L}^{-1}$  tendremos una remoción de turbiedad del 81,0% (69,16 NTU), si aumentamos la concentración a  $40 \text{ mg.L}^{-1}$  se tiene una remoción de la turbiedad del 95,5% (16,38 NTU). Además, en lugar de emplear un tiempo de sedimentación de 10 minutos se utilizó 30 minutos, la remoción aumenta del 80,5% (70,98 NTU) a 96,9% (11,28 NTU).

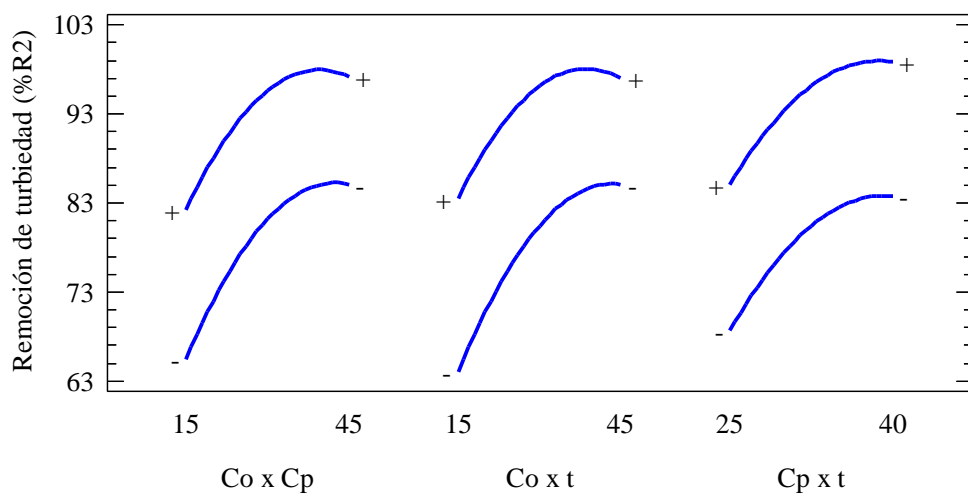
En el tratamiento realizado por Guzmán (2020) de las aguas de drenaje mina utilizando *Caeslphia spinosa* (guarango) como biocoagulante para el tratamiento de aguas de la industria minera en Ecuador consiguieron remociones de la turbiedad del 79,59%, 97,70% y 91,88% donde el guarango no generó cambios bruscos de pH con cantidades menores de lodos residuales. Martínez y Solís (2014) obtuvieron una remoción de turbidez del 95% del agua que consumían los pobladores de los asentamientos humanos en Alto Juan XXIII Arequipa con dosis óptima de sulfato de aluminio como coagulante de  $50 \text{ mg.L}^{-1}$ . Tejada (2017) realizó el tratamiento y sedimentación de la turbidez de las aguas residuales de los relaves mineros de la Unidad Operativa Minera Santiago B en Ananea Puno empleando como coagulante cal, se obtuvo una remoción de la turbidez del 99,976% con una concentración de cal al 5%. Ururi (2018) evaluó el proceso de sedimentación en las aguas residuales del circuito de pozas de la Unidad Operativa Minera Halcón de Oro en Ananea Puno utilizando poliacrilamida aniónica como floculante para una sedimentación del 99,2% de la turbidez (61,7 NTU) en 30 minutos.

Orihuela (2022) sostiene que la coagulación es fundamental para la eliminación de material coloidal o suspendida en soluciones neutralizándose la carga eléctrica de las partículas en suspensión y reduciendo la repulsión entre ellas facilitando la aglomeración producida principalmente por la acción de las fuerzas de Van der Waals siendo estas interacciones débiles pero significativas entre las moléculas.

En la figura 8 se muestra el gráfico de interacciones para las variables concentración de *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller (Co), concentración de poliacrilamida (Cp) y tiempo de sedimentación (t) para la remoción de turbiedad.

### Figura 8

Gráfico de interacción para la remoción de turbiedad.



En la figura 8 se muestra que hay interacción entre las variables concentración de *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller - concentración de poliacrilamida y concentración de *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller - tiempo de sedimentación donde el efecto de una variable depende del nivel en el que está la otra variable. Por otro lado, no hay interacción entre las variables concentración

de poliacrilamida - tiempo de sedimentación. El efecto de una variable depende del nivel en el que está otra de las variables.

## 4.2. REMOCIÓN DE PLOMO Y TURBIDEZ DE LAS AGUAS CON RELAVES MINEROS DEL LAGO COMUNI

### 4.3.1. Diseño experimental de Box-Wilson

La matriz del diseño de Box-Wilson y los resultados experimentales obtenidos en los procesos de remoción por coagulación-floculación de plomo y turbiedad de las aguas con relaves mineros provenientes del lago Comuni de La Rinconada se presentan en la tabla 14.

**Tabla 14**

*Matriz del diseño de Box-Wilson y respuestas observadas.*

N°	Concentración de <i>Opuntia ficus-indica</i> (L.) Miller		Concentración de poliacrilamida		Tiempo de sedimentación		Remoción de plomo	Remoción de turbiedad
	x <sub>1</sub>	Co (mg/L)	x <sub>2</sub>	Cp (mg/L)	x <sub>3</sub>	t (min)	%R <sub>1</sub>	%R <sub>2</sub>
1	-1	15	-1	25	-1	10	46,40	50,92
2	1	45	-1	25	-1	10	58,63	75,41
3	-1	15	1	40	-1	10	64,39	67,68
4	1	45	1	40	-1	10	74,46	88,13
5	-1	15	-1	25	1	30	71,22	70,99
6	1	45	-1	25	1	30	87,05	88,60
7	-1	15	1	40	1	30	74,46	87,10
8	1	45	1	40	1	30	96,40	99,23
9	-1,682	4,77	0	32,5	0	20	55,76	62,31
10	1,682	55,23	0	32,5	0	20	83,81	88,19
11	0	30	-1,682	19,87	0	20	61,51	67,48
12	0	30	1,682	45,11	0	20	77,34	92,70
13	0	30	0	32,5	-1,682	3,18	52,52	66,81
14	0	30	0	32,5	1,682	36,82	89,93	92,74
15	0	30	0	32,5	0	20	83,81	92,12
16	0	30	0	32,5	0	20	82,05	92,46
17	0	30	0	32,5	0	20	83,81	93,20

### 4.3.2. Modelo de regresión

Los coeficientes para las variables y sus interacciones del modelo de regresión representada por la ecuación (4) para el diseño de Box-Wilson se muestra en la tabla 15.

**Tabla 15**

*Coefficientes de regresión del modelo ajustado para la remoción de plomo y turbiedad.*

Coeficiente	Remoción de plomo		Remoción de turbiedad	
	Codificado	Natural	Codificado	Natural
$\beta_0$	+83,08	-102,5429	+92,53	-112,4150
$\beta_1$	+7,85	+1,2554	+8,66	+2,7502
$\beta_2$	+5,35	+6,3428	+7,22	+6,2237
$\beta_3$	+10,85	+3,3429	+7,86	+3,0389
$\beta_{11}$	-4,25	-0,0189	-5,91	-0,0263
$\beta_{22}$	-4,37	-0,0778	-4,20	-0,0746
$\beta_{33}$	-3,74	-0,0374	-4,31	-0,0431
$\beta_{12}$	+0,49	+0,0044	-1,19	-0,0106
$\beta_{13}$	+1,93	+0,0129	-1,90	-0,0127
$\beta_{23}$	-2,65	-0,0354	-0,34	-0,0046

Reemplazando los coeficientes estimados en la ecuación (4), obtenemos el modelo de regresión para la remoción de plomo de las aguas con relaves mineros provenientes del lago Comuni de la Rinconada en términos de sus variables codificadas es:

$$\begin{aligned} Y_1 = & +83,08 + 7,85 x_1 + 5,35 x_2 + 10,85 x_3 - 4,25 x_1^2 \\ & - 4,37 x_2^2 - 3,74 x_3^2 \\ & + 0,49 x_1 x_2 + 1,93 x_1 x_3 - 2,65 x_2 x_3 \end{aligned} \quad (11)$$

El modelo de regresión para la remoción de plomo en términos de sus variables naturales es la siguiente:

$$\begin{aligned} \%R_1 = & -102,5429 + 1,2554 Co + 6,3428 Cp + 3,3429 t \\ & - 0,0189 Co^2 - 0,0778 Cp^2 \\ & -0,0374 t^2 + 0,0044 CoCp + 0,0129 Cot \\ & - 0,0354 Cpt \end{aligned} \quad (12)$$

Así mismo, el modelo de regresión para la remoción de turbiedad de las aguas con relaves mineros provenientes del lago Comuni de la Rinconada en términos de sus variables codificadas esta por dada por la expresión:

$$\begin{aligned} Y_2 = & +92,53 + 8,66 x_1 + 7,22 x_2 + 7,86 x_3 - 5,91 x_1^2 \\ & - 4,20 x_2^2 - 4,31 x_3^2 \\ & -1,19 x_1x_2 - 1,90 x_1x_3 - 0,34 x_2x_3 \end{aligned} \quad (13)$$

La expresión matemática del modelo de regresión para la remoción de turbiedad en términos de sus variables naturales es:

$$\begin{aligned} \%R_2 = & -112,4150 + 2,7502 Co + 6,2237 Cp + 3,0389 t \\ & - 0,0263 Co^2 - 0,0746 Cp^2 \\ & -0,0431 t^2 - 0,0106 CoCp - 0,0127 Cot \\ & - 0,0046 Cpt \end{aligned} \quad (14)$$

#### 4.3.3. Análisis de varianza

Se utilizó el análisis de varianza para evaluar los modelos de regresión obtenidas para la remoción de plomo (%R<sub>1</sub>) (ecuación 11) y remoción de turbiedad (%R<sub>2</sub>) (ecuación 13). La significancia de los coeficientes se evaluó con un nivel de confianza del 95%. Los datos de la prueba F revelaron la significancia de cada variable del coeficiente y se utilizaron los p-valores para determinar la significancia de las variables y sus interacciones. Se evaluaría si el p-valor

disminuía y el F-valor aumentaba. Si el p-valor es  $< 0,05$  entonces el modelo, variables e interacciones son estadísticamente significativos.

Para el análisis de varianza, los datos del diseño de Box-Wilson fueron analizados utilizando el software estadístico Design-Expert 7 versión de prueba.

En el análisis de varianza las hipótesis a probar fueron las siguientes:

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

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

La tabla 16 muestra el análisis de varianza para el modelo de regresión desarrollado para la remoción de plomo (%R<sub>1</sub>) de las aguas con relaves mineros provenientes del lago Comuni de La Rinconada.

**Tabla 16**

*Análisis de varianza del modelo de regresión para la remoción de plomo.*

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrado medio	F valor	p-valor
Modelo (%R <sub>1</sub> )	3292,72	9	365,86	75,14	< 0,0001
Concentración de <i>Opuntia ficus-indica</i> (L.) Miller ( $C_o$ )	842,17	1	842,17	172,96	< 0,0001
Concentración de poliacrilamida ( $C_p$ )	390,56	1	390,56	80,21	< 0,0001
Tiempo de sedimentación ( $t$ )	1607,48	1	1607,48	330,14	< 0,0001
$C_o \times C_p$	1,95	1	1,95	0,40	0,5469
$C_o \times t$	29,92	1	29,92	6,14	0,0423
$C_p \times t$	56,34	1	56,34	11,57	0,0114
$C_o^2$	203,26	1	203,26	41,75	0,0003
$C_p^2$	215,63	1	215,63	44,29	0,0003
$t^2$	157,44	1	157,44	32,34	0,0007
Residual	34,08	7	4,87		
Falta de ajuste	32,02	5	6,40	6,20	0,1447
Error puro	2,07	2	1,03		
Total	3326,80	16			



Según la tabla 16 los valores observados para  $R_1$  (F-valor = 75,14; p-valor  $< 0,01$ ) con lo cual se demuestra que el modelo de regresión para la remoción de plomo es estadísticamente significativo. Además, todos los términos lineales como la concentración de *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller, la concentración de poliacrilamida y el tiempo de sedimentación, los términos interactivos con excepción de la interacción concentración de *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller - concentración de poliacrilamida y los términos cuadráticos fueron significativos con un valor de p-valor  $< 0,01$ .

Esto significa que el tiempo de sedimentación es una variable más importante que afecta en la remoción de plomo que la concentración de *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller seguida de la concentración de poliacrilamida. Por otro lado, la falta de ajuste no fue significativa con un p-valor  $> 0,05$ . Según los resultados obtenidos se rechaza la hipótesis nula ( $H_0$ ) y se acepta la hipótesis alterna ( $H_1$ ). Se puede afirmar que la mayoría de los regresores contribuyen de manera significativa al modelo de regresión con un nivel de significancia de 0,05.

En la tabla 17 se muestra el análisis de varianza para el modelo de regresión desarrollado para la remoción de turbiedad ( $\%R_2$ ) de las aguas con relaves mineros provenientes del lago Comuni de La Rinconada.

**Tabla 17***Análisis de varianza del modelo de regresión para la remoción de turbiedad.*

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrado medio	F valor	p-valor
Modelo (%R <sub>2</sub> )	3141,54	9	349,06	175,38	< 0,0001
Concentración de <i>Opuntia ficus-indica</i> (L.) Miller ( $C_o$ )	1023,10	1	1023,10	514,04	< 0,0001
Concentración de poliacrilamida ( $C_p$ )	712,38	1	712,38	357,92	< 0,0001
Tiempo de sedimentación ( $t$ )	844,44	1	844,44	424,28	< 0,0001
$C_o \times C_p$	11,33	1	11,33	5,69	0,0485
$C_o \times t$	28,88	1	28,88	14,51	0,0066
$C_p \times t$	0,94	1	0,94	0,47	0,5144
$C_o^2$	393,77	1	393,77	197,85	< 0,0001
$C_p^2$	198,76	1	198,76	99,86	< 0,0001
$t^2$	209,44	1	209,44	105,23	< 0,0001
Residual	13,93	7	1,99		
Falta de ajuste	13,32	5	2,66	8,74	0,1059
Error puro	0,61	2	0,30		
Total	3155,47	16			

En la tabla 17 los valores observados para R<sub>2</sub> (F-valor = 175,38; p-valor < 0,05) demuestran que el modelo de regresión para la remoción de turbiedad es significativo desde el punto de vista estadístico. Así mismo, todos los términos lineales como la concentración de *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller, la concentración de poliacrilamida y el tiempo de sedimentación, los términos interactivos excepto la interacción concentración de poliacrilamida - tiempo de sedimentación y los términos cuadráticos resultaron significativos con un valor de p-valor < 0,05. Por tanto, la concentración de *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller es la variable más importante para la remoción de turbiedad que el tiempo de sedimentación seguida de la concentración de poliacrilamida. Además, la falta de ajuste no fue significativa (p-valor > 0,05). Por consiguiente, se rechaza la





hipótesis nula ( $H_0$ ) y se acepta la hipótesis alterna ( $H_1$ ) contribuyendo los regresores al modelo de regresión con un nivel de significancia de 0,05.

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

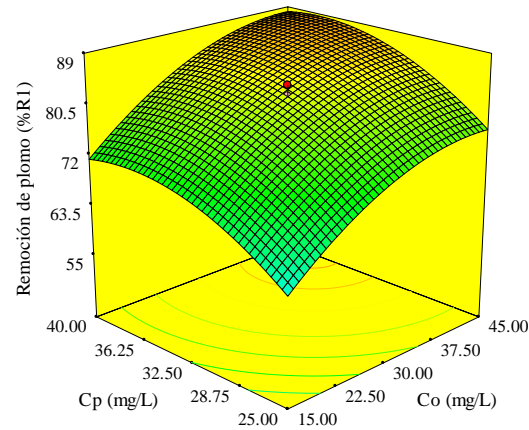
##### 4.3.4.1. Superficie de respuesta y gráfico de contorno para la remoción de plomo

En las figuras 9 a 11 se ilustran las superficies de respuesta y las gráficas de contorno de la ecuación (12) para la remoción de plomo de las aguas con relaves mineros provenientes del lago Comuni de La Rinconada con una concentración inicial de plomo en las aguas de  $0,0278 \text{ mg.L}^{-1}$ .

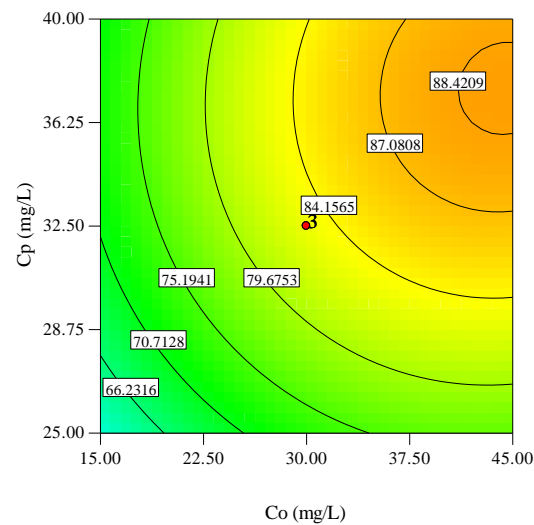
En la figura 9 se ilustra los efectos de la concentración de *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller (Co) y la concentración de poliacrilamida (Cp) para la remoción de plomo con un tiempo de sedimentación de 20 minutos, en la figura para concentraciones de *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller de  $41,3 \text{ mg.L}^{-1}$  a  $45,0 \text{ mg.L}^{-1}$  y concentración de poliacrilamida de  $35,5 \text{ mg.L}^{-1}$  a  $39,7 \text{ mg.L}^{-1}$  tenemos una remoción de plomo del 88,42% ( $0,0032 \text{ mg.L}^{-1}$ ).

### Figura 9

Gráfico de superficie de respuesta y contorno para el efecto de concentración de *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller y concentración de poliacrilamida para la remoción de plomo.



a) Superficie de respuesta



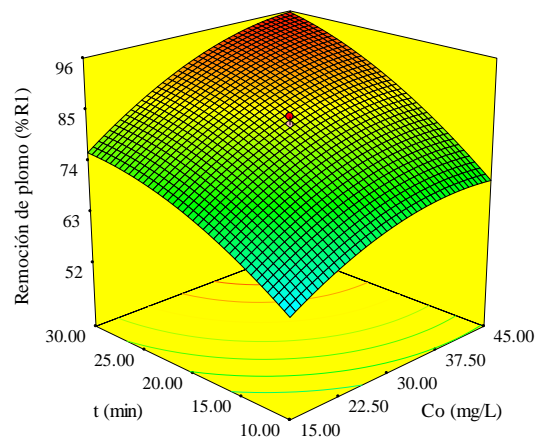
b) Gráfica de contorno

En la figura 10 se representa los efectos de la concentración de *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller ( $C_o$ ) y el tiempo de sedimentación ( $t$ ) para la remoción de plomo con una concentración de poliacrilamida  $32,5 \text{ mg.L}^{-1}$ , se visualiza para las concentraciones de *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller de  $39,4 \text{ mg.L}^{-1}$  a  $45,0 \text{ mg.L}^{-1}$  y tiempo de sedimentación de 28 min a 30

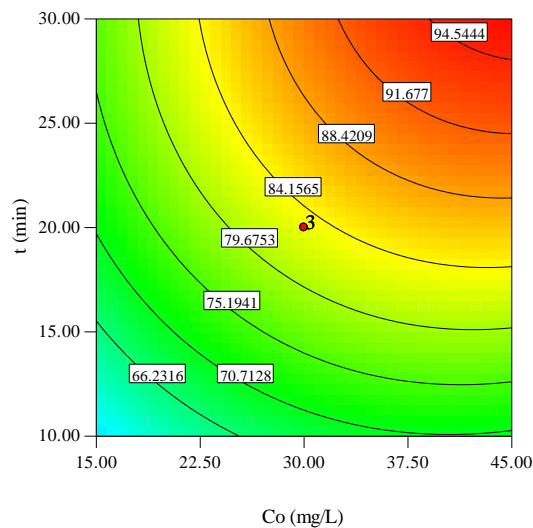
min obtenemos resultados de remoción de plomo del 94,54% (0,0015 mg.L<sup>-1</sup>).

### Figura 10

Gráfico de superficie de respuesta y contorno para el efecto de concentración de *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller y tiempo de sedimentación para la remoción de plomo.



a) Superficie de respuesta



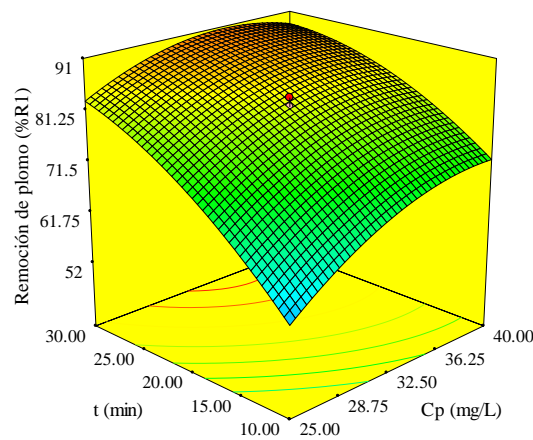
b) Gráfica de contorno

La figura 11 se representa los efectos de la concentración de poliacrilamida (Cp) y el tiempo de sedimentación (t) para la remoción de plomo con una concentración de *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller de 30,0

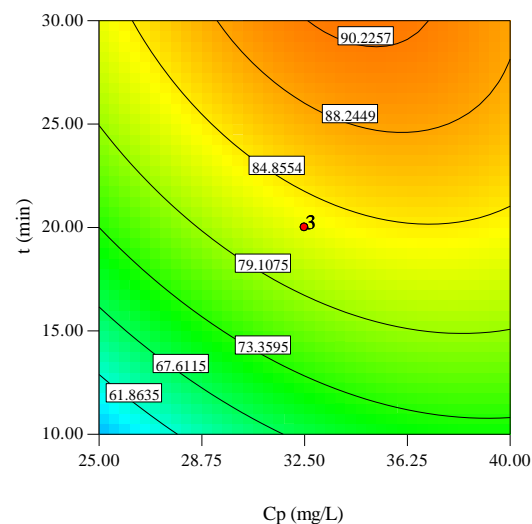
mg.L<sup>-1</sup>, se observa que para las concentraciones de poliacrilamida de 32,5 mg.L<sup>-1</sup> a 37,2 mg.L<sup>-1</sup> y tiempo de sedimentación de 28,8 min a 30 min obtenemos resultados de remoción de plomo del 90,23% (0,0027 mg.L<sup>-1</sup>).

### Figura 11

Gráfico de superficie de respuesta y contorno para el efecto de concentración de poliacrilamida y tiempo de sedimentación para la remoción de plomo.



a) Superficie de respuesta



b) Gráfica de contorno

En el estudio de remoción de plomo de las aguas del río Toro Q'ocha por precipitación química realizado por Apaza (2015) se utilizaron



hidróxido de calcio e hidróxido de sodio. Las remociones fueron del 99,10% con hidróxido de calcio al 1% a pH 9,77 y del 98,55% con hidróxido de sodio al 1% a pH 8,92; siendo la velocidad de mezcla de 40 rpm y tiempo de agitación de 20 minutos.

Así mismo, Monroy (2019) alcanzó una remoción de plomo del 62,50% de aguas residuales de mina del centro poblado minero de La Rinconada-Puno mediante procesos de adsorción, floculación y sedimentación empleando chacko (hidralgirita) 1 gramo por litro de agua residual a un pH 5,50 sometidos a una agitación de 30 rpm por 70 minutos. España (2022) logró remociones de plomo que se encontraban dentro del rango de 48,75 a 52,50% de efluentes de relaveras en la provincia de Caravelí mediante el tratamiento de neutralización con cal de concentración  $1,05 \text{ g.L}^{-1}$  a un pH 8,50.

Por otro lado, Campos y Ríos (2021) obtuvieron remociones del plomo en un rango del 55% al 69% utilizando como coagulante *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller “nopal” y del 16% a 43% de *Echinopsis pachanoi* “san pedro” respectivamente de la cuenca alta del río Moche-Trujillo, para dosis de coagulante de  $20 \text{ mg.L}^{-1}$  y tiempo de remoción de 30 minutos; siendo nuestro resultado superior a los obtenidos en esta investigación. La Organización Mundial de la Salud (OMS) emite periódicamente los “Estándares Internacionales de Agua Potable” conocidos en su posterioridad como “Guías para la Calidad del Agua Potable” en donde se estable los Límites Máximos Permisibles para los metales pesados como el plomo.



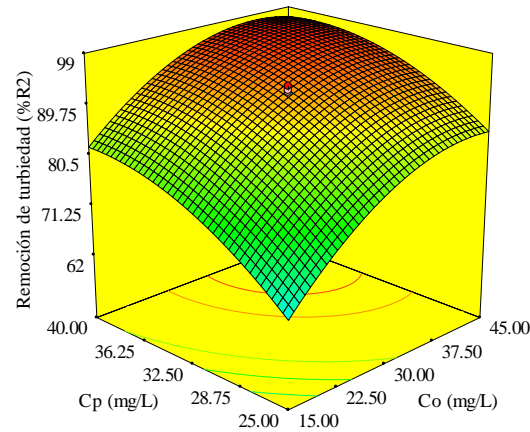
La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) también incluye los límites máximos para contaminantes como el plomo. Nuestro país no es ajeno a la regulación de plomo en las aguas cuya normativa se encuentra el Reglamento de Calidad de Agua para Consumo Humano del D.S. N° 031-2010-SA. Es importancia el tratamiento de plomo para de esta manera evitar los impactos ambientales que rompen los equilibrios de los ecosistemas, afectar la salud pública, degradar los cuerpos de agua a través de la filtración al entorno, contaminar los suelos con metales y el aire mediante levantamiento y arrastre de material fino por acción del viento (Cruzado y Bravo, 2010).

#### **4.3.4.2. Superficie de respuesta y gráfico de contorno para la remoción de turbiedad**

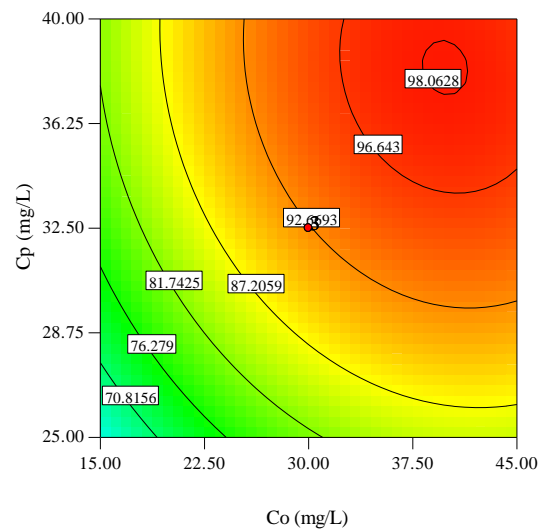
En las figuras 12 a 14 se presentan las superficies de respuesta y las gráficas de contorno de la ecuación (14) para la remoción de turbiedad de las aguas con relaves mineros provenientes del lago Comuni de La Rinconada con una turbiedad inicial de las aguas de 364 NTU.

**Figura 12**

Gráfico de superficie de respuesta y contorno para el efecto de concentración de *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller y concentración de poliacrilamida para la remoción de turbiedad.



a) Superficie de respuesta



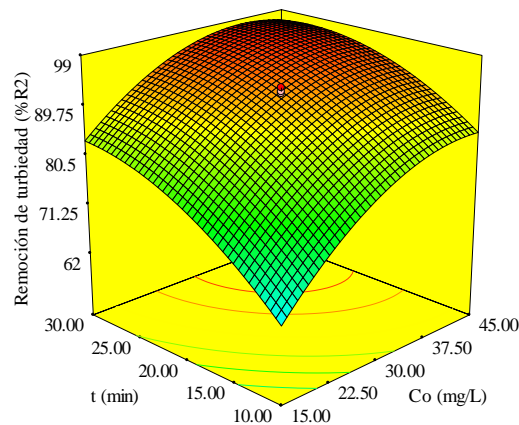
b) Gráfica de contorno

En la figura 12 se muestra los efectos de la concentración de *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller ( $C_o$ ) y la concentración de poliacrilamida ( $C_p$ ) para la remoción de la turbiedad con un tiempo de sedimentación de 20 minutos se aprecia en la figura para las concentraciones de *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller de  $37,5 \text{ mg.L}^{-1}$  a  $41,0 \text{ mg.L}^{-1}$  y concentración de

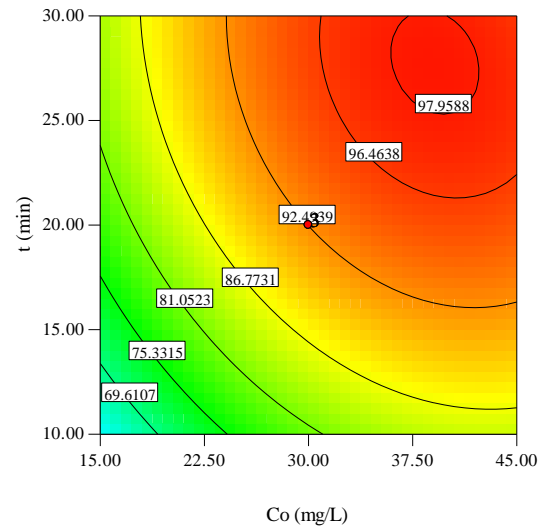
poliacrilamida de  $37,2 \text{ mg.L}^{-1}$  a  $39,0 \text{ mg.L}^{-1}$  proporcionan resultados de remoción de turbiedad del 98,06% (7,06 NTU).

### Figura 13

Gráfico de superficie de respuesta y contorno para el efecto de concentración de *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller y tiempo de sedimentación para la remoción de turbiedad.



a) Superficie de respuesta



b) Gráfica de contorno

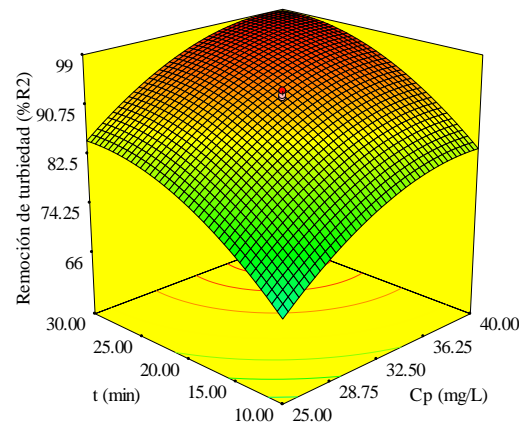
En la figura 13 se muestran los efectos de la concentración de *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller ( $C_o$ ) y el tiempo de sedimentación ( $t$ ) para la remoción de turbiedad con una concentración de poliacrilamida  $32,5$



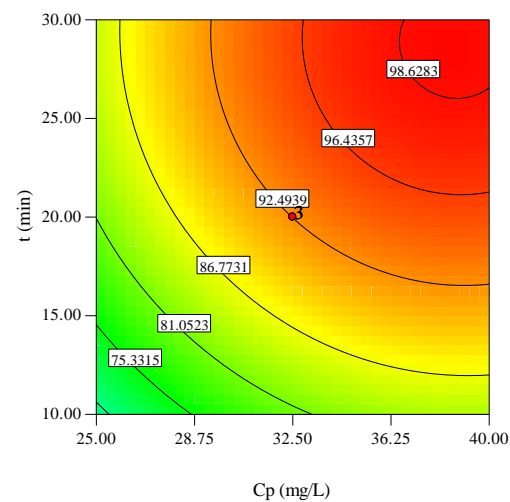
mg.L<sup>-1</sup>, en el gráfico se observa que para las concentraciones de *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller de 36,6 mg.L<sup>-1</sup> a 42,5 mg.L<sup>-1</sup> y tiempo de sedimentación de 25,8 minutos a 30 minutos tenemos una remoción de turbiedad del 97,96% (7,43 NTU).

### Figura 14

Gráfico de superficie de respuesta y contorno para el efecto de concentración de poliacrilamida y tiempo de sedimentación para la remoción de turbiedad.



a) Superficie de respuesta



b) Gráfica de contorno



En la figura 14 se ilustra los efectos de la concentración de poliacrilamida (Cp) y el tiempo de sedimentación (t) para la remoción de turbiedad con una concentración de *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller de 30,0 mg.L<sup>-1</sup>, en la figura visualizamos que para concentraciones de poliacrilamida de 36,7 mg.L<sup>-1</sup> a 40,0 mg.L<sup>-1</sup> y tiempo de sedimentación de 26,5 min a 30 min obtenemos una remoción de turbiedad del 98,63% (4,99 NTU).

En el tratamiento de aguas de bajas turbiedades en la planta de agua potable Quicapata en Ayacucho realizado por Oré (2014), evaluó el sulfato de aluminio y policloruro de aluminio. En el estudio se destaca que el sulfato de aluminio tuvo un rango de utilización para depurar aguas con una turbiedad no menor de 20 NTU y no mayor de 200 NTU con un promedio de concentración de coagulante de 2,25 ppm y el policloruro de aluminio actuó como un agente para la formación de flóculos en un rango menor a 10 NTU y dosis promedio de 0,49 ppm. Para la remoción de la turbidez de las aguas residuales de mina por procesos de adsorción, floculación y sedimentación de flujo ascendente empleando arcilla chacko (hidralgiritita) reportada por Monroy (2019), se establecieron las condiciones óptimas de pH, concentración de soluto-solvente y tiempo de agitación; logrando una alta eficiencia de remoción de turbidez (89,13%) utilizando los parámetros óptimos. El tratamiento de aguas realizado por Sucaticona (2022) para la remoción de turbiedad en aguas naturales por coagulación-floculación con policloruro de aluminio ayudado con harina de papa deshidratada de la especie Imilla rosada removieron la turbiedad en un 93,88% a un pH óptimo de 7,3. Llampi (2022) evaluó la influencia



del pH para la remoción de turbidez de las aguas residuales en la minera Mosoqminas en Ananea Puno empleando superfloac A-110, a un pH 5, la turbidez promedio bajo a 263,6 NTU, a pH 7 se disminuyó a 180,3 NTU, y a pH 9, la turbidez se redujo a 131,4 NTU de una turbidez inicial de 9890 NTU.

#### 4.3.5. Localización del punto estacionario

La estimación de las condiciones o valores de las variables  $Co$ ,  $Cp$  y  $t$  que maximizan el porcentaje de remoción de plomo y turbiedad se realizó derivando parcialmente las ecuaciones de los modelos de regresión (ecuación 11 y 13) con respecto a las variables. Derivando la ecuación (11) tenemos:

$$\frac{\partial Y_1}{\partial x_1} = 7,85 - 8,50 x_1 + 0,49 x_2 + 1,93 x_3 = 0 \quad (15)$$

$$\frac{\partial Y_1}{\partial x_2} = 5,35 - 8,74 x_2 + 0,49 x_1 - 2,65 x_3 = 0 \quad (16)$$

$$\frac{\partial Y_1}{\partial x_3} = 10,85 - 7,48 x_3 + 1,93 x_1 - 2,65 x_2 = 0 \quad (17)$$

Resolviendo las ecuaciones anteriores, los valores óptimos en términos de sus variables codificadas y decodificando con las ecuaciones (6) fueron:

$$\begin{array}{l} x_1 = \\ 1,33 \end{array} \quad \text{y} \quad \begin{array}{l} Co = 49,95 \\ \text{mg.L}^{-1} \end{array}$$

$$\begin{array}{l} x_2 = \\ 0,16 \end{array} \quad \text{y} \quad \begin{array}{l} Cp = 33,70 \\ \text{mg.L}^{-1} \end{array}$$



$$x_3 = \quad \quad \quad t = 37,40$$

$$1,74 \quad \quad \quad \text{y} \quad \quad \quad \text{min}$$

Reemplazando los valores obtenidos en la ecuación (12), se obtuvo el máximo porcentaje de remoción de plomo:

$$\text{Remoción de plomo } (\%R_1) = 98,00 \text{ (0,0006 mg.L}^{-1}\text{)}.$$

La concentración final de plomo según el máximo porcentaje de remoción se encuentra por debajo de la concentración de plomo (0,01 mg.L<sup>-1</sup>) del establecido por los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) Categoría 3: Riego y bebida de animales. Por consiguiente, la *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller y la poliacrilamida resultaron ser una alternativa eficaz para la remoción de plomo de aguas con relaves mineros.

Derivando la ecuación (13) tenemos:

$$\frac{\partial Y_2}{\partial x_1} = 8,66 - 11,82 x_1 - 1,19 x_2 - 1,90 x_3 = 0 \quad (18)$$

$$\frac{\partial Y_2}{\partial x_2} = 7,22 - 8,40 x_2 - 1,19 x_1 - 0,34 x_3 = 0 \quad (19)$$

$$\frac{\partial Y_2}{\partial x_3} = 7,86 - 8,62 x_3 - 1,90 x_1 - 0,34 x_2 = 0 \quad (20)$$

Resolviendo las ecuaciones obtendremos los valores óptimos en términos de sus variables codificadas y decodificadas según la ecuación (6) fueron:

$$x_1 = \quad \quad \quad Co = 37,95$$

$$0,53 \quad \quad \quad \text{Y} \quad \quad \quad \text{mg.L}^{-1}$$



$$\begin{array}{rcl}
 x_2 = & & C_p = 38,13 \\
 & Y & \\
 0,75 & & \text{mg.L}^{-1} \\
 \\ 
 x_3 = & & t = 27,60 \\
 & Y & \\
 0,76 & & \text{min}
 \end{array}$$

Reemplazando los valores de las variables naturales en la ecuación (14) obtendremos el máximo porcentaje de remoción de turbiedad:

$$\text{Remoción de turbiedad } (\%R_2) = 100,00 \text{ (0,00 NTU)}.$$

Según estos resultados se obtiene una remoción del 100% de la turbidez. Bellotti (2006) sostiene que la turbidez de las aguas residuales mineras es debido a los sedimentos suspendidos ocasionados por la erosión del suelo y la eliminación de vegetación. Por tanto, el tratamiento de estas aguas con *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller y la poliacrilamida representa una alternativa viable para el tratamiento de la turbidez.

#### 4.3.6. Análisis de máximos y mínimos

El análisis de máximos y mínimos para el modelo de regresión ajustada para la remoción de plomo:

$$\begin{aligned}
 Y_1 = & +83,08 + 7,85 x_1 + 5,35 x_2 + 10,85 x_3 - 4,25 x_1^2 \\
 & - 4,37 x_2^2 - 3,74 x_3^2 + 0,49 x_1x_2 + 1,93 x_1x_3 \\
 & - 2,65 x_2x_3
 \end{aligned} \tag{21}$$

Derivado la ecuación de regresión codificada, se tiene las siguientes ecuaciones diferenciales:



$$\frac{\partial^2 Y_1}{\partial x_1^2} = -8,50 \quad (22)$$

$$\frac{\partial^2 Y_1}{\partial x_2^2} = -8,74 \quad (23)$$

$$\frac{\partial^2 Y_1}{\partial x_3^2} = -7,48 \quad (24)$$

$$\frac{\partial^2 Y_1}{\partial x_1 x_2} = +0,49 \quad (25)$$

$$\frac{\partial^2 Y_1}{\partial x_1 x_3} = +1,93 \quad (26)$$

$$\frac{\partial^2 Y_1}{\partial x_2 x_3} = -2,65 \quad (27)$$

Utilizando el criterio de la matriz Hessiana se tiene las siguientes determinantes:

$$H_{11} = -8,50$$

$$H_{22} = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 Y_1}{\partial x_1^2} & \frac{\partial^2 Y_1}{\partial x_1 x_2} \\ \frac{\partial^2 Y_1}{\partial x_1 x_2} & \frac{\partial^2 Y_1}{\partial x_2^2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -8,50 & +0,49 \\ +0,49 & -8,74 \end{bmatrix} = +74,05$$

$$H_{33} = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 Y_1}{\partial x_1^2} & \frac{\partial^2 Y_1}{\partial x_1 x_2} & \frac{\partial^2 Y_1}{\partial x_1 x_3} \\ \frac{\partial^2 Y_1}{\partial x_1 x_2} & \frac{\partial^2 Y_1}{\partial x_2^2} & \frac{\partial^2 Y_1}{\partial x_2 x_3} \\ \frac{\partial^2 Y_1}{\partial x_1 x_3} & \frac{\partial^2 Y_1}{\partial x_2 x_3} & \frac{\partial^2 Y_1}{\partial x_3^2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -8,50 & +0,49 & +1,93 \\ +0,49 & -8,74 & -2,65 \\ +1,93 & -2,65 & -7,48 \end{bmatrix} = -466,66$$



Los signos de los determinantes fueron (-8,50), (+74,05) y (-466,66), según Ayala y Pardo (1995) indica que el modelo de regresión para la remoción de plomo tiene un máximo en el rango evaluado.

Así mismo, el análisis de máximos y mínimos para modelo de regresión ajustada para la remoción de turbidez tenemos:

$$Y_2 = +92,53 + 8,66 x_1 + 7,22 x_2 + 7,86 x_3 - 5,91 x_1^2 - 4,20 x_2^2 - 4,31 x_3^2 - 1,19 x_1x_2 - 1,90 x_1x_3 - 0,34 x_2x_3 \quad (28)$$

Derivado el modelo de regresión para la remoción de turbidez obtenemos las siguientes ecuaciones diferenciales:

$$\frac{\partial^2 Y_2}{\partial x_1^2} = -11,82 \quad (29)$$

$$\frac{\partial^2 Y_2}{\partial x_2^2} = -8,40 \quad (30)$$

$$\frac{\partial^2 Y_2}{\partial x_3^2} = -8,62 \quad (31)$$

$$\frac{\partial^2 Y_2}{\partial x_1 x_2} = -1,19 \quad (32)$$

$$\frac{\partial^2 Y_2}{\partial x_1 x_3} = -1,90 \quad (33)$$

$$\frac{\partial^2 Y_2}{\partial x_2 x_3} = -0,34 \quad (34)$$

Utilizando el criterio de la matriz Hessiana se tiene las siguientes determinantes:



$$H_{11} = -11,82$$

$$H_{22} = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 Y_2}{\partial x_1^2} & \frac{\partial^2 Y_2}{\partial x_1 x_2} \\ \frac{\partial^2 Y_2}{\partial x_1 x_2} & \frac{\partial^2 Y_2}{\partial x_2^2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -11,82 & -1,19 \\ -1,19 & -8,40 \end{bmatrix} = +97,87$$

$$H_{33} = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 Y_2}{\partial x_1^2} & \frac{\partial^2 Y_2}{\partial x_1 x_2} & \frac{\partial^2 Y_2}{\partial x_1 x_3} \\ \frac{\partial^2 Y_2}{\partial x_1 x_2} & \frac{\partial^2 Y_2}{\partial x_2^2} & \frac{\partial^2 Y_2}{\partial x_2 x_3} \\ \frac{\partial^2 Y_2}{\partial x_1 x_3} & \frac{\partial^2 Y_2}{\partial x_2 x_3} & \frac{\partial^2 Y_2}{\partial x_3^2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -11,82 & -1,19 & -1,90 \\ -1,19 & -8,40 & -0,34 \\ -1,90 & -0,34 & -8,62 \end{bmatrix} = -813,50$$

Los signos de los determinantes obtenidos fueron (-11,82), (+97,87) y (-813,50), estos resultados nos indican que el modelo de regresión para la turbidez tiene un máximo en el rango evaluado (Ayala y Pardo, 1995).





## V. CONCLUSIONES

**PRIMERA:** La alta turbidez (364 NTU) indica una elevada concentración de partículas suspendidas, lo que limita la penetración de luz, afecta la vida acuática y reduce la calidad del agua. Además, la presencia de plomo ( $0,0278 \text{ mg.L}^{-1}$ ), aunque por debajo de los límites permitidos para consumo humano, representa un riesgo para la salud y los ecosistemas acuáticos. El pH (6,48) ligeramente ácido y la temperatura ( $14,3 \text{ }^\circ\text{C}$ ) no compensan estos problemas. Por lo que el lago Comuni presenta una alteración significativa de su calidad.

**SEGUNDA:** En el estudio exploratorio se ajustó el pH con la adición de 0,02 g de CaO y se utilizó *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller en concentraciones de  $15 \text{ mg.L}^{-1}$ ,  $25 \text{ mg.L}^{-1}$ ,  $30 \text{ mg.L}^{-1}$ ,  $40 \text{ mg.L}^{-1}$  y  $45 \text{ mg.L}^{-1}$ . La mezcla se agitó a 150 rpm durante 1 minuto y luego a 80 rpm durante 15 minutos para la agitación lenta y con un tiempo de sedimentación de 30 minutos. En donde el punto óptimo de remoción de plomo y turbidez se alcanzó con un pH de 9,2,  $45 \text{ mg.L}^{-1}$  *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller,  $40 \text{ mg.L}^{-1}$  poliacrilamida y un tiempo de sedimentación de 30 min, obteniendo así una mejora en la sedimentación y la calidad del agua tratada.

**TERCERA:** El estudio de optimización se realizó utilizando la Metodología de Superficie de Respuesta (MSR) basado en el diseño de Box-Wilson, los resultados experimentales permitieron obtener modelos no lineales para la remoción de plomo y de la turbidez del agua en función a la concentración de *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller, concentración de poliacrilamida y tiempo de sedimentación; con los valores óptimos de



estas variables se obtiene los valores óptimos de remoción de plomo y turbidez. Los resultados demuestran que el tratamiento aplicado es altamente efectivo en la reducción de plomo en el agua, puesto que se redujo la concentración desde un valor inicial de  $0,0278 \text{ mg.L}^{-1}$  hasta menos de  $0,0006 \text{ mg.L}^{-1}$ , lo que representa una remoción del 98% del plomo. Esta concentración final cumple con los estándares establecidos. Por otra parte, el valor óptimo obtenido con el modelo matemático para la turbidez permite predecir la eliminación completa de la turbidez del agua. Estos resultados evidencian la eficacia del proceso en la purificación del agua.



## VI. RECOMENDACIONES

- PRIMERA:** En cuanto a la evaluación y análisis de resultados, es crucial comparar técnicas precisas para medir el plomo y la turbidez que permitirá determinar cuál de ellos ofrece una mayor eficiencia en el tratamiento de aguas contaminadas por relaves mineros.
- SEGUNDA:** Elaborar guías prácticas para la implementación de estos coagulantes en plantas de tratamiento y capacitar al personal en el manejo adecuado de los mismos contribuirá a la efectividad y seguridad del proceso.
- TERCERA:** Finalmente, se sugiere realizar estudios a largo plazo para evaluar la estabilidad de la remoción de contaminantes y explorar nuevas tecnologías que puedan complementar el uso de los coagulantes evaluados, mejorando aún más la eficiencia del tratamiento de aguas contaminadas.



## VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alanya, J. (2024). *Reducción de la turbidez en aguas del drenaje minero en la empresa aurífera retamas mediante coagulación y floculación 2022-2023*. Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Ambiental, Escuela Académico Profesional de Ingeniería Ambiental, Universidad Continental, Huancayo, Perú. [https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500,12394/14405/2/IV\\_FIN\\_107\\_TE\\_Alanya\\_Camasca\\_2024.pdf](https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500,12394/14405/2/IV_FIN_107_TE_Alanya_Camasca_2024.pdf)
- Apaza, D. (2015). *Remoción De Metales Plomo (Pb) Y Zinc (Zn) De Las Aguas Del Rio T'oro Q'ocha Por Precipitación Alcalina En La Ciudad De Juliaca* (Tesis de Pregrado). Universidad Nacional del Altiplano. Recuperado de: <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500,14082/1774>.
- Apuntes Ingeniero Civil. (2010). *Apuntes Ingeniero Civil*. <https://apuntesingenierocivil.blogspot.com/>
- Autoridad Nacional del Agua. (2016). *R.J. N° 010-2016-ANA: Protocolo Nacional para el Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hídricos Superficiales*. [https://www.ana.gob.pe/sites/default/files/normatividad/files/r.j.\\_010-2016-ana\\_0.pdf](https://www.ana.gob.pe/sites/default/files/normatividad/files/r.j._010-2016-ana_0.pdf)
- Ayala, J. & Pardo, R. (1995). *Optimización por Diseños Experimentales con Aplicaciones en Ingeniería*. Lima, Perú: AB S.A.
- Basualto, F. (2019). *Extracción de sulfato mediante resinas de intercambio iónico* (Tesis de pregrado). Universidad de Concepción, Concepción, Chile. [http://repositorio.udec.cl/bitstream/11594/347/1/Tesis\\_Extraccion\\_de\\_sulfato\\_mediante\\_resinas\\_de\\_intercambio\\_ionico.Image.Marked.pdf](http://repositorio.udec.cl/bitstream/11594/347/1/Tesis_Extraccion_de_sulfato_mediante_resinas_de_intercambio_ionico.Image.Marked.pdf)
- Belloti, M. (2006). *Minería A Cielo Abierto Versus Glaciares En Alerta Roja En Argentina*. Revista de Derecho de Daños, 1(1), 1-29. Recuperado de <https://core.ac.uk/download/33553708.pdf>
- Bortone, G., De Gisi, S., y Pons, M. (2018). *Evaluación de floculantes sintéticos para el tratamiento de aguas residuales*. Revista de Ingeniería de Procesos de Agua, 26, 106-116



- Bravo, D. (2023). *Tratamiento y disposición final de relaves generados en la planta de Beneficio Eminza S.A., ubicada en el cantón Santa Rosa, Provincia El Oro* (Trabajo de titulación). Universidad Nacional de Loja. Recuperado de: <https://dspace.unl.edu.ec/jspui/handle/123456789/27391>.
- Bravo, M. (2017). *Coagulantes y floculantes naturales usados en la reducción de turbidez, sólidos suspendidos, colorantes y metales pesados en aguas residuales* (Proyecto de grado Modalidad Monografía). Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/11349/5609>.
- Burillo, C., Cardona, A., Castro-Larragoitia, J., & Montes, I. (2017). *Caracterización y modelación hidrogeoquímica de lixiviados mineros de San Luis Potosí, S.L.P. México*. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 69(3), 637–654. <https://doi.org/10.18268/bsgm2017v69n3a7>
- Campos, S. & Rios, A. (2021). *Eficiencia De Opuntia ficus-indica (L.) Miller Y Echinopsis Pachanoi En La Remoción De Plomo (II) De La Cuenca Alta Del Río Moche - Trujillo 2019-2020* (Tesis de Pregrado). Universidad Privada del Norte. Recuperado de: <https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/29347?show=full>.
- Caparachin, K. & Salas, I. (2017). *Remoción de Hierro de las Aguas Ácidas de la Mina Carhuacayán Mediante el Coagulante del Cactáceo Opuntia Floccosa a nivel de Laboratorio*. (Tesis de Licenciatura). Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo, Perú
- Chávez, J. & Cholán, J. (2018). *Evaluación del mucílago de “Opuntia ficus-indica” en la reducción de metales en drenaje ácido de mina de la Quebrada Honda - Colquirrumi S.A.* (Tesis de Licenciatura). Escuela de Ingeniería de Minas. Universidad Privada del Norte, Cajamarca, Perú.
- Congreso de la República del Perú. (2005). Ley de Recursos Hídricos. Ley N° 29338. <https://www.congreso.gob.pe/>
- Cruzado, R., & Bravo, L. (2010). Impactos ambientales de la minería en ecosistemas y salud pública. Editorial Universitaria.
- Dammert Lira, A., & Molinelli Aristondo, F. (2007, septiembre). Panorama de la minería en el Perú. OSINERGMIN.



<https://www.gob.pe/institucion/osinergmin/informes-publicaciones/483434-panorama-de-la-mineria-en-el-peru>

- De la Rosa, J., & Santana, D. (2001). El nopal. Usos, manejo agronómico y costes de producción de México. Texcoco, México: CONAZA-UACH-CIESTAAM.
- España, J. (2022). *Remoción de metales en efluentes de relaveras para alcanzar agua de categoría 3 de la provincia de Caravelí 2020. Huancayo* (Tesis de pregrado) Universidad Continental. Recuperado de [https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500,12394/12493/2/IV\\_FIN\\_107\\_TE\\_Espana\\_Chamorro\\_2022.pdf](https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500,12394/12493/2/IV_FIN_107_TE_Espana_Chamorro_2022.pdf).
- Garzón, W. (2021). Estudio sobre la combinación de mezclas naturales y químicas para el proceso de coagulación/floculación en la remoción de la turbidez del agua desde una perspectiva química en el tratamiento del agua. Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD. Escuela de Ciencias Básicas, Tecnologías e Ingenierías - ECBTI.
- Guzmán, S. (2020). *Tratamiento de aguas de drenaje de mina mediante biocoagulación con Caesalpinia spinosa (Guarango)* (Tesis de pregrado). Universidad de las Américas. Recuperado de: <https://dspace.udla.edu.ec/handle/33000/12055>.
- Íñiguez, G., & Hernández, R. (2010). Estudio para la rehabilitación de una planta de tratamiento de vinazas tequileras mediante un floculante polimérico de poliacrilamida (PAM). *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 26(4), 299-311.
- León, D. (2015). *Aplicación De Un Coagulante Natural Obtenido A Partir De La Penca De Tuna (Opuntia ficus-indica) Para La Mejora De La Calidad En Aguas De Consumo En La Localidad De Achocalla - La Paz Bolivia* (Proyecto de Grado). Universidad Mayor de San Andrés. Recuperado de: <https://repositorio.umsa.bo/bitstream/handle/123456789/9335/PG-1468-Alcazar%20Le%c3%b3n%2c%20Daniela.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Llampi, S. (2022). *Influencia del pH en la reducción de la turbidez con Superfloc A-110 en aguas residuales de mineral aurífero, en minería Mosoqminas, Ananea* (Tesis



- de Grado). Universidad Nacional del Altiplano. Recuperado de:  
<https://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500,14082/19398>.
- Mamani, W. (2018). *Caracterización y tratamiento de efluentes de aguas ácidas en la mina La Rinconada - Puno* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Altiplano]. Universidad Nacional del Altiplano.  
<https://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.13008/4212>.
- Martínez, J. & González, L. (2012). *Evaluación del poder coagulante de la tuna (Opuntia ficus-indica) para la remoción de turbidez y color en aguas crudas*. (Tesis de maestría). Escuela de Ingeniería Química, Universidad de Cartagena, Colombia.
- Martínez, K., & Solis, C. (2014). *Análisis Comparativo De Coagulantes, Floculantes Y Decantación Lastrada Aplicados En El Proceso De Eliminación De Agentes Contaminantes En Un Sistema de Afluentes* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa. Recuperado de:  
<http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/3990>
- Menéndez, J., & Muñoz, S. (2021). *Contaminación Del Agua Y Suelo Por Los Relaves Mineros*. *Paideia* XXI, 11(1), 141–154.  
<https://doi.org/10.31381/paideia.v11i1.3622>
- Monroy (2019). *Remoción De Plomo Pb (II) De Soluciones Acuosas Y Aguas Residuales De Mina, Por Adsorción, Floculación – Sedimentación De Flujo Ascendente Batch Utilizando Chacko (Hidralgirita) Y Cal (Cao), Puno*. [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Altiplano Puno]  
<http://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500,14082/11856>
- Montgomery, C. (2004). *Diseño y Análisis de Experimentos* (2da ed.). Editorial Limusa S.A: México.
- Nharingo, T., Zivurawa, M. T., & Guyo, U. (2015). Exploring the use of cactus *Opuntia ficus indica* in the biocoagulation–flocculation of Pb(II) ions from wastewaters. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 12. DOI: .1007/s13762-015-0815-0.
- Oré, L. (2014). *Evaluación de la Eficiencia del Floculante Sulfato de Aluminio y Polifloc Empleado en la Depuración de Aguas con Baja Turbiedad de la Planta de*



*Tratamiento de Agua Potable de Quicapata- Ayacucho* (tesis de pregrado). Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, Ayacucho, Perú. Recuperado de: <http://repositorio.unsch.edu.pe/handle/UNSCH/1037>.

Organización de los Estados Americanos – OAS. (2023). *Armonización de los estándares de agua potable en las Américas*. <https://www.oas.org/dsd/publications/classifications/Armoniz.EstandaresAguaPotable.pdf>

Orihuela, A. (2022). *Evaluación de dos métodos para la remoción de plomo en las aguas del canal de irrigación Merys, Junín, 2022*. Tesis para optar el título profesional de Ingeniería Ambiental, Escuela Académica Profesional de Ingeniería Ambiental, Universidad Continental, Huancayo, Perú.

Silva, M. (2017). *Extracción del mucílago de la penca de tuna y su aplicación en el proceso de coagulación-floculación de aguas turbias*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Química e Ingeniería Química, Escuela Profesional de Ingeniería Química]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM. <https://cybertesis.unmsm.edu.pe/backend/api/core/bitstreams/b09d386e-eda5-4f48-a656-01af27b34f5e/content>

Sucaticona, Z. (2022). *Tratamiento De Aguas Naturales Por Floculación Con Sales De Aluminio Y Floculante Ayuda Harina De Papa Deshidratada, Para Remoción De Turbiedad, Aluminio Residual Y Reducción Del Floculante* (Trabajo de Pregrado). Universidad Nacional Del Altiplano, Puno. Recuperado de: <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500,14082/18691>.

Tejada, R. (2017). *Tratamiento Y Sedimentación De La Turbidez Con Cal En Las Aguas Residuales De Los Relaves Mineros De La Unidad Operativa Minera Santiago – B* (Tesis de Pregrado). Universidad Nacional Del Altiplano, Puno, Perú. Recuperado de: <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/4695>.

Terroba, L. (2010). *Tratamiento de relaves de tipo aluvial con Policloruro de Aluminio*. (Tesis Pre Grado). Facultad de Ingeniería Geológica e Ingeniería Metalurgista. Universidad Nacional del Altiplano Puno - Perú.





- Ubillus, J. (2003). *Estudio sobre la presencia del plomo en el medio ambiente de Talara en el año 2003* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional Mayor de San Marcos. [https://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/Tesis/Ingenie/ubillus\\_lj/ubillus\\_lj.PDF](https://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/Tesis/Ingenie/ubillus_lj/ubillus_lj.PDF)
- Ururi, D. (2018). *Evaluación Del Proceso De Sedimentación Con Poliacrilamida Aniónica En Las Aguas Residuales Del Circuito De Pozas De La Unidad Operativa Minera Halcón De Oro - Ananea* [Tesis de pregrado]. Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú.
- US EPA (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos). (2013). *Plomo*. <https://www.epa.gov/lead> (Recuperado el 08 de agosto de 2024). Informe sobre la exposición al plomo en niños (PDF).
- Vázquez, D. (1994). *Extracción de coagulantes naturales del nopal y aplicación en la clarificación de aguas superficiales*. (Tesis de Maestría). Escuela de Ingeniería, Universidad Autónoma de Nuevo León, Monterrey, México
- Villanueva, J. (2019). *Efecto de tres concentraciones de mucílago de tuna (Opuntia ficus-indica (L.) Miller) y de San Pedro (Echinopsis pachanoi (Britton & Rose) Friedrich & G.D. Rowley) en la clarificación del agua*. (Tesis de licenciatura). Universidad Nacional de Cajamarca, Perú.
- Villena, J., & Huamán, J. (2019). *Características socioeconómicas y condiciones de salud en la población de La Rinconada, Puno*. *Revista de Investigación en Salud*, 26(1), 83-88. <http://www.scielo.org.pe/pdf/rins/v26n1/a08v26n1.pdf>



## ANEXOS

### ANEXO 1. Especificaciones técnicas de poliacrilamida Aniónica

Productos*	A-100	A-100HMW	A-110	A-110HMW	A-120	A-120HMW
<b>Propiedades típicas</b>						
Apariencia	← Polvo granular blanco →					
Grado de Carga, %	7	7	16	16	20	20
Peso molecular relativo	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	Muy Alto
Densidad a granel, kg/m <sup>3</sup>	800 ± 50	800 ± 50	825 ± 50	825 ± 50	825 ± 50	825 ± 50
pH de solución al 0.5%, 25 °C	5.0 - 7.0	5.0 - 7.0	5.0 - 7.0	5.0 - 7.0	5.0 - 7.0	5.0 - 7.0
Viscosidad, cps:						
0.10%	100	150	150	200	200	250
0.25%	250	450	350	500	400	550
0.50%	500	900	700	950	800	1000
<b>Especificaciones de venta del producto</b>						
Insolubles, % w/w (método BD 37)	0.5 máx.	0.5 máx.	0.5 máx.	0.5 máx.	0.5 máx.	2.0 máx.
Acrlamida residual, % (método BD 52)	0.050 máx.	0.050 máx.	0.050 máx.	0.050 máx.	0.050 máx.	0.020 máx.
PWG <sup>†</sup> , Acrlamida residual, % (método BD52)	0.020 máx.	-	0.020 máx.	-	0.020 máx.	-
Viscosidad estándar, cps (método 20, 20A, 21)	4.0 - 5.4	5.0 - 6.0	4.2 - 5.6	5.0 - 6.0	4.4 - 5.8	6.0 - 7.4
<b>Permisos normativos (las siguientes denominaciones cumplen estos requisitos normativos)</b>						
Control del inventario químico	← Véase la Hoja de Seguridad →					
NSF Internacional	A-100	-	A-110	-	A-120	-
Máximo nivel de uso	1.0 mg/L	-	1 mg/L	-	1 mg/L	-
Drinking Water Inspectorate (UK)	A-100 PWG	-	A-110 PWG	-	A-120PWG	-
CEN (EN 1407)	A-100 PWG	-	A-110 PWG	-	A-120 PWG	-
FDA (21 CFR 173.5, azúcar)	A-100	A-100 HMW	A-110	A-110 HMW	A-120	A-120 HMW

\* Nota: Estos productos están disponibles. Solicite a nuestro representante de Kemira información sobre otros productos que tal vez no se hayan mostrado aquí.  
† Grado potable



## ANEXO 2. Límites máximos permisibles de parámetros de calidad

Parámetros	Unidad de medida	Límite máximo permisible
1. Olor	---	Aceptable
2. Sabor	---	Aceptable
3. Color	UCV escala Pt/Co	15
4. Turbiedad	UNT	5
5. pH	Valor de pH	6,5 a 8,5
6. Conductividad (25°C)	$\mu\text{mho/cm}$	1 500
7. Sólidos totales disueltos	$\text{mg L}^{-1}$	1 000
8. Cloruros	$\text{mg Cl}^{-1} \text{ L}^{-1}$	250
9. Sulfatos	$\text{mg SO}_4^{-1} \text{ L}^{-1}$	250
10. Dureza total	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	500
11. Amoníaco	$\text{mg N L}^{-1}$	1,5
12. Hierro	$\text{mg Fe L}^{-1}$	0,3
13. Manganeso	$\text{mg Mn L}^{-1}$	0,4
14. Aluminio	$\text{mg Al L}^{-1}$	0,2
15. Cobre	$\text{mg Cu L}^{-1}$	2,0
16. Zinc	$\text{mg Zn L}^{-1}$	3,0
17. Sodio	$\text{mg Na L}^{-1}$	200

UCV = Unidad de color verdadero

UNT = Unidad nefelométrica de turbiedad

**ANEXO 3.** Límites máximos permisibles de parámetros químicos inorgánicos y orgánicos

Parámetros Inorgánicos	Unidad de medida	Límite máximo permisible
1. Antimonio	mg Sb L <sup>-1</sup>	0,020
2. Arsénico (nota 1)	mg As L <sup>-1</sup>	0,010
3. Bario	mg Ba L <sup>-1</sup>	0,700
4. Boro	mg B L <sup>-1</sup>	1,500
5. Cadmio	mg Cd L <sup>-1</sup>	0,003
6. Cianuro	mg CN <sup>-</sup> L <sup>-1</sup>	0,070
7. Cloro (nota 2)	mg L <sup>-1</sup>	5
8. Clorito	mg L <sup>-1</sup>	0,7
9. Clorato	mg L <sup>-1</sup>	0,7
10. Cromo total	mg Cr L <sup>-1</sup>	0,050
11. Flúor	mg F L <sup>-1</sup>	1,000
12. Mercurio	mg Hg L <sup>-1</sup>	0,001
13. Niquel	mg Ni L <sup>-1</sup>	0,020
14. Nitratos	mg NO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	50,00
15. Nitritos	mg NO <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	3,00 Exposición corta 0,20 Exposición larga
16. Plomo	mg Pb L <sup>-1</sup>	0,010
17. Selenio	mg Se L <sup>-1</sup>	0,010
18. Molibdeno	mg Mo L <sup>-1</sup>	0,07
19. Uranio	mg U L <sup>-1</sup>	0,015

Parámetros Orgánicos	Unidad de medida	Límite máximo permisible
1. Trihalometanos totales (nota 3)		1,00
2. Hidrocarburo disuelto o emulsionado; aceite mineral	mgL <sup>-1</sup>	0,01
3. Aceites y grasas	mgL <sup>-1</sup>	0,5
4. Alacloro	mgL <sup>-1</sup>	0,020
5. Aldicarb	mgL <sup>-1</sup>	0,010
6. Aldrin y dieldrin	mgL <sup>-1</sup>	0,00003
7. Benceno	mgL <sup>-1</sup>	0,010
8. Clordano (total de isómeros)	mgL <sup>-1</sup>	0,0002
9. DDT (total de isómeros)	mgL <sup>-1</sup>	0,001
10. Endrin	mgL <sup>-1</sup>	0,0006
11. Gamma HCH (lindano)	mgL <sup>-1</sup>	0,002
12. Hexaclorobenceno	mgL <sup>-1</sup>	0,001
13. Heptacloro y heptacloroepóxido	mgL <sup>-1</sup>	0,00003
14. Metoxicloro	mgL <sup>-1</sup>	0,020
15. Pentaclorofenol	mgL <sup>-1</sup>	0,009
16. 2,4-D	mgL <sup>-1</sup>	0,030
17. Acrilamida	mgL <sup>-1</sup>	0,0005
18. Epiclorhidrina	mgL <sup>-1</sup>	0,0004
19. Cloruro de vinilo	mgL <sup>-1</sup>	0,0003
20. Benzopireno	mgL <sup>-1</sup>	0,0007
21. 1,2-dicloroetano	mgL <sup>-1</sup>	0,03
22. Tetracloroetano	mgL <sup>-1</sup>	0,04



**ANEXO 4. Cadena de Custodia - LAQUAMEQ E.I.R.L.**

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

Nombre del cliente:  
**KEAVY LINDOSAY PAYE ZUMI**

Objetivo:  
**REMOCIÓN DE PLOMO Y TURBIDEZ CON OPUUNTIA FICUS-INDICA (L.) MILLER Y PASA CALAMITA EN AGUAS CON RELAJES MINEROS DEL LAGO COMANI DE LA GUANACAZA, 2024.**

Cadena de Custodia - MATRIZ AGUA

Punto de muestreo:  
**PUNO SAN ANTONIO DE PERIÑA**

Punto de muestreo / Etiqueta	Fecha de muestreo	DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA		PARAMETROS DE LA MUESTRA				PARAMETROS DE ANÁLISIS		Método analítico / Norma
		Identificación	Substrato	Volumen (L)	Temperatura (°C)	PH	Conductividad (µS/cm)	Concentración (mg/L)	Concentración (mg/L)	
1	2024/04/12		8384555.24		X					
2	18/12		452642.97		X			X		
3										
4										
5										
6										
7										
8										
9										
10										
11										
12										
13										
14										
15										
16										
17										
18										
19										
20										
21										
22										
23										
24										
25										
26										
27										
28										
29										
30										
31										
32										
33										
34										
35										
36										
37										
38										
39										
40										
41										
42										
43										
44										
45										
46										
47										
48										
49										
50										

Elaborado por: **KEAVY LINDOSAY PAYE ZUMI**

Revisado por: **KEAVY LINDOSAY PAYE ZUMI**

Fecha: **2024-04-12**

Hora: **16:00**

## ANEXO 5. Resultados del análisis físico químico y metales del agua



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

#### INFORME DE RESULTADOS N°: LQ - 05924A

##### DATOS DEL SERVICIO

Solicitante : Keavy Lindsay Paye Zuni

Proyecto : REMOCIÓN DE PLOMO Y TURBIDEZ CON OPUNTIA FICUS-INDICA (L.) MILLER Y POLIACRILAMIDA EN AGUAS CON RELAVES MINEROS DEL LAGO COMUNI DE LA RINCONADA, 2024

##### DATOS DEL SERVICIO

Producto : Agua  
Numero de muestras : 01  
Fecha de análisis : 13/06/2024  
Muestreado por : El cliente

Ubicación, fecha y hora de muestreo:

Código	Dist. /Prov. / Depart.	Ubicación	Fecha y hora de muestreo
M - Inicial	Ananea /San Antonio de Putina/Puno	E: 452642.97 N: 8381555.21	12/06/2024 16:12

##### METODO DE ENSAYO

PARÁMETRO	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
Plomo	mg/l	SM 3500 - Pb B Método espectrofotométrico de absorción atómica





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

**DATOS DEL RESULTADO**

N°	PARÁMETRO	UNIDAD	PMA - 01
1	Temperatura	°C	14.3
2	Potencial de hidrogeno	Unid. de pH	6.48
3	Turbidez	NTU	364
4	Plomo	mg/L	0.0278

**OBSERVACIÓN**

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

FECHA DE EMISIÓN DEL INFORME: 10/07/2024

LAQUAMEQ E.I.R.L.  
LABORATORIO Y PUNTO  
*[Firma]*  
Ing. Karol Kelly Quispe Quispe  
CIP. 124504  
C. U. E. N. T. E.

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

Página 2 de 4



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

**INFORME DE RESULTADOS N°: LQ - 04524A**

**DATOS DEL SERVICIO**

**Solicitante** : Keavy Lindsay Paye Zuni

**Proyecto** : REMOCIÓN DE PLOMO Y TURBIDEZ CON OPUNTIA FICUS-INDICA (L) MILLER Y POLIACRILAMIDA EN AGUAS CON RELAVES MINEROS DEL LAGO COMUNI DE LA RINCONADA, 2024

**DATOS DEL SERVICIO**

**Producto** : Agua  
**Numero de muestras** : 17  
**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
T - 1/ T - 17	Juliaca /San Román/Puno	E: 379728.932 N: 8285463.787	17/06/2024 15:30

\*T: Tratamiento

**METODO DE ENSAYO**

PARÁMETRO	UNIDAD	MÉTODO
Temperatura	°C	SM - 2550 B Método de laboratorio
Potencial de hidrogeno	Unid. de pH	SM 4500 - H
Turbidez	NTU	SM - 2130 Método nefelométrico
Plomo	mg/L	SM 3500 - Pb B Método espectrofotométrico de absorción atómica



Jr. Deustua 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**

CÓDIGO	TEMPERATURA EN LABORATORIO (°C)	pH	TURBIDEZ (NTU)	PLOMO (mg/L.)
T - 1	13.4	8.6	178.65	0.0149
T - 2	13.1	8.8	89.51	0.0115
T - 3	13.4	8.9	117.64	0.0099
T - 4	13.2	9.2	43.21	0.0071
T - 5	13.5	8.8	105.60	0.0080
T - 6	13.4	9.5	41.50	0.0036
T - 7	13.3	8.6	46.96	0.0071
T - 8	13.5	9.2	2.80	0.0010
T - 9	13.5	8.8	137.19	0.0123
T - 10	13.6	8.7	42.99	0.0045
T - 11	13.7	9.0	118.37	0.0107
T - 12	13.6	8.8	26.57	0.0063
T - 13	13.8	9.1	120.81	0.0132
T - 14	13.7	9.0	26.43	0.0028
T - 15	13.8	9.3	28.68	0.0045
T - 16	13.8	8.7	27.45	0.0050
T - 17	13.6	8.9	24.75	0.0045

**OBSERVACIÓN**

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

FECHA DE EMISIÓN DEL INFORME: 10/07/2024

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

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

**ANEXO 6.** Fotografías del desarrollo de las tesis realizadas en el laboratorio.



Nota: La figura ilustra el procedimiento de muestreo en el Lago Comuni, donde se lleva a cabo la recolección de muestras de agua para el análisis de sus propiedades fisicoquímicas.



Nota: La fotografía muestra el equipo usado para la evaluación de los parámetros fisicoquímicos (temperatura, pH, turbidez).



Nota: La fotografía muestra el equipo de absorción atómica para la evaluación de plomo.



Nota: La fotografía muestra cladodios usados como materia prima para la obtención de polvo de *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller.



Nota: La fotografía muestra cómo se está retirando las espinas de *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller.



Nota: La fotografía muestra el procedimiento para cortar en forma de prisma rectangular, y su posterior secado en una estufa de extracto sólido.



Nota: La fotografía muestra la obtención final del polvo de *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller (sólido), en donde se observó visualmente cual de lo obtenido es el mejor para el tratamiento.



Nota: La fotografía muestra el pesado en mg de poliacrilamida y *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller.



Nota: La fotografía muestra el análisis realizado el equipo PHIPPS & BIRD PB-900 para el proceso de coagulación – floculación.



Nota: La fotografía muestra la evaluación del tiempo de sedimentación en el test de jarras.



Nota: La fotografía evidencia el resultado final del tratamiento.

## ANEXO 7. Determinación de los coeficientes del modelo de regresión de segundo

orden.

Los coeficientes de la ecuación de regresión para el ajuste de los resultados de los diseños experimentales se calcularon de acuerdo a la fórmula matricial:

$$\beta = (X'X)^{-1} X'y \quad (35)$$

### - PARA LA REMOCIÓN DEL PLOMO

$$X = \begin{bmatrix} x_0 & x_1 & x_2 & x_3 & x_1^2 & x_2^2 & x_3^2 & x_1x_2 & x_1x_3 & x_2x_3 \\ +1 & -1 & -1 & -1 & +1 & +1 & +1 & +1 & +1 & +1 \\ +1 & +1 & -1 & -1 & +1 & +1 & +1 & -1 & -1 & +1 \\ +1 & -1 & +1 & -1 & +1 & +1 & +1 & -1 & +1 & -1 \\ +1 & +1 & +1 & -1 & +1 & +1 & +1 & +1 & -1 & -1 \\ +1 & -1 & -1 & +1 & +1 & +1 & +1 & +1 & -1 & -1 \\ +1 & +1 & -1 & +1 & +1 & +1 & +1 & -1 & +1 & -1 \\ +1 & -1 & +1 & +1 & +1 & +1 & +1 & -1 & -1 & +1 \\ +1 & +1 & +1 & +1 & +1 & +1 & +1 & +1 & +1 & +1 \\ +1 & -1,682 & 0 & 0 & +2,829 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ +1 & +1,682 & 0 & 0 & +2,829 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ +1 & 0 & -1,682 & 0 & 0 & +2,829 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ +1 & 0 & +1,682 & 0 & 0 & +2,829 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ +1 & 0 & 0 & -1,682 & 0 & 0 & +2,829 & 0 & 0 & 0 \\ +1 & 0 & 0 & +1,682 & 0 & 0 & +2,829 & 0 & 0 & 0 \\ +1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ +1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ +1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ +1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad y = \begin{bmatrix} 46,40 \\ 58,63 \\ 64,39 \\ 74,46 \\ 71,22 \\ 87,05 \\ 74,46 \\ 96,40 \\ 55,76 \\ 83,81 \\ 61,51 \\ 77,34 \\ 52,52 \\ 89,93 \\ 83,81 \\ 82,05 \\ 83,81 \end{bmatrix}$$

$$X'X = \begin{bmatrix} 17 & 0 & 0 & 0 & 13,658 & 13,658 & 13,658 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 13,658 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 13,658 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 13,658 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 13,658 & 0 & 0 & 0 & 24,006 & 8 & 8 & 0 & 0 & 0 \\ 13,658 & 0 & 0 & 0 & 8 & 24,006 & 8 & 0 & 0 & 0 \\ 13,658 & 0 & 0 & 0 & 8 & 8 & 24,006 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 8 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 8 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 8 \end{bmatrix}$$





$$(X'X)^{-1} = \begin{bmatrix} 0,332 & 0 & 0 & 0 & -0,113 & -0,113 & -0,113 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,073 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,073 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,073 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0,113 & 0 & 0 & 0 & 0,089 & 0,026 & 0,026 & 0 & 0 & 0 \\ -0,113 & 0 & 0 & 0 & 0,026 & 0,089 & 0,026 & 0 & 0 & 0 \\ -0,113 & 0 & 0 & 0 & 0,026 & 0,026 & 0,089 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,125 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,125 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,125 \end{bmatrix}$$

$$X'y = \begin{bmatrix} 1243,550 \\ 107,250 \\ 73,036 \\ 148,174 \\ 967,854 \\ 965,817 \\ 976,001 \\ 3,950 \\ 15,470 \\ -21,230 \end{bmatrix}$$

Reemplazando las matrices  $(X'X)^{-1}$  y  $X'y$  en la formula matricial se tiene:

$$\beta = \begin{bmatrix} 0,332 & 0 & 0 & 0 & -0,113 & -0,113 & -0,113 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,073 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,073 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,073 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0,113 & 0 & 0 & 0 & 0,089 & 0,026 & 0,026 & 0 & 0 & 0 \\ -0,113 & 0 & 0 & 0 & 0,026 & 0,089 & 0,026 & 0 & 0 & 0 \\ -0,113 & 0 & 0 & 0 & 0,026 & 0,026 & 0,089 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,125 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,125 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,125 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1243,550 \\ 107,250 \\ 73,036 \\ 148,174 \\ 967,854 \\ 965,817 \\ 976,001 \\ 3,950 \\ 15,470 \\ -21,230 \end{bmatrix}$$



El vector de los estimadores paramétricos estuvo representado por:

$$\beta = \begin{bmatrix} +83,08 \\ +7,85 \\ +5,35 \\ +10,85 \\ -4,25 \\ -4,37 \\ -3,74 \\ +0,49 \\ +1,93 \\ -2,65 \end{bmatrix}$$

**- PARA LA REMOCIÓN DE TURBIDEZ**

	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1^2$	$x_2^2$	$x_3^2$	$x_1x_2$	$x_1x_3$	$x_2x_3$	$Y$
$X =$	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	50,92
	+1	+1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	+1	75,41
	+1	-1	+1	-1	+1	+1	+1	-1	+1	-1	67,68
	+1	+1	+1	-1	+1	+1	+1	+1	-1	-1	88,13
	+1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	-1	-1	70,99
	+1	+1	-1	+1	+1	+1	+1	-1	+1	-1	88,60
	+1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	-1	-1	+1	87,10
	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	99,23
	+1	-1,682	0	0	+2,829	0	0	0	0	0	$y =$ 62,31
	+1	+1,682	0	0	+2,829	0	0	0	0	0	88,19
	+1	0	-1,682	0	0	+2,829	0	0	0	0	67,48
	+1	0	+1,682	0	0	+2,829	0	0	0	0	92,70
	+1	0	0	-1,682	0	0	+2,829	0	0	0	66,81
	+1	0	0	+1,682	0	0	+2,829	0	0	0	92,74
	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	92,12
	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	92,46
	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	93,20



$$X'X = \begin{bmatrix} 17 & 0 & 0 & 0 & 13,658 & 13,658 & 13,658 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 13,658 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 13,658 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 13,658 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 13,658 & 0 & 0 & 0 & 24,006 & 8 & 8 & 0 & 0 & 0 \\ 13,658 & 0 & 0 & 0 & 8 & 24,006 & 8 & 0 & 0 & 0 \\ 13,658 & 0 & 0 & 0 & 8 & 8 & 24,006 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 8 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 8 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 8 \end{bmatrix}$$

$$(X'X)^{-1} = \begin{bmatrix} 0,332 & 0 & 0 & 0 & -0,113 & -0,113 & -0,113 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,073 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,073 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,073 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0,113 & 0 & 0 & 0 & 0,089 & 0,026 & 0,026 & 0 & 0 & 0 \\ -0,113 & 0 & 0 & 0 & 0,026 & 0,089 & 0,026 & 0 & 0 & 0 \\ -0,113 & 0 & 0 & 0 & 0,026 & 0,026 & 0,089 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,125 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,125 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,125 \end{bmatrix}$$

$$X'y = \begin{bmatrix} 1376,070 \\ 118,210 \\ 98,640 \\ 107,394 \\ 1053,825 \\ 1081,210 \\ 1079,427 \\ -9,520 \\ -15,200 \\ -2,740 \end{bmatrix}$$

$$\beta = \begin{bmatrix} 0,332 & 0 & 0 & 0 & -0,113 & -0,113 & -0,113 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,073 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,073 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,073 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0,113 & 0 & 0 & 0 & 0,089 & 0,026 & 0,026 & 0 & 0 & 0 \\ -0,113 & 0 & 0 & 0 & 0,026 & 0,089 & 0,026 & 0 & 0 & 0 \\ -0,113 & 0 & 0 & 0 & 0,026 & 0,026 & 0,089 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,125 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,125 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,125 \end{bmatrix} x \begin{bmatrix} 1376,070 \\ 118,210 \\ 98,640 \\ 107,394 \\ 1053,825 \\ 1081,210 \\ 1079,427 \\ -9,520 \\ -15,200 \\ -2,740 \end{bmatrix}$$



El vector de los estimadores paramétricos estuvo representado por:

$$\beta = \begin{bmatrix} +92,53 \\ +8,66 \\ +7,22 \\ +7,86 \\ -5,91 \\ -4,20 \\ -4,31 \\ -1,19 \\ -1,90 \\ -0,34 \end{bmatrix}$$

**ANEXO 8.** Cálculos para el análisis de varianza (ANOVA).

**Tabla 18**

*Análisis de varianza del modelo de segundo orden.*

Fuente	Suma de cuadrados (SC)	Grados de libertad (GL)	Cuadrado medio (CM)	F-valor	p-valor
Modelo	$SC_M$	$GL_M$	$CM_M$	$F = \frac{CM_M}{CM_R}$	F-valor > Ftablas
$x_1$	$SC_{x_1}$	$GL_{x_1}$	$CM_{x_1}$	$F = \frac{CM_{x_1}}{CM_R}$	F-valor > Ftablas
$x_2$	$SC_{x_2}$	$GL_{x_2}$	$CM_{x_2}$	$F = \frac{CM_{x_2}}{CM_R}$	F-valor > Ftablas
$x_3$	$SC_{x_3}$	$GL_{x_3}$	$CM_{x_3}$	$F = \frac{CM_{x_3}}{CM_R}$	F-valor > Ftablas
$x_1 x_2$	$SC_{x_1 x_2}$	$GL_{x_1 x_2}$	$CM_{x_1 x_2}$	$F = \frac{CM_{x_1 x_2}}{CM_R}$	F-valor > Ftablas
$x_1 x_3$	$SC_{x_1 x_3}$	$GL_{x_1 x_3}$	$CM_{x_1 x_3}$	$F = \frac{CM_{x_1 x_3}}{CM_R}$	F-valor > Ftablas
$x_2 x_3$	$SC_{x_2 x_3}$	$GL_{x_2 x_3}$	$CM_{x_2 x_3}$	$F = \frac{CM_{x_2 x_3}}{CM_R}$	F-valor > Ftablas
$x_1^2$	$SC_{x_1^2}$	$GL_{x_1^2}$	$CM_{x_1^2}$	$F = \frac{CM_{x_1^2}}{CM_R}$	F-valor > Ftablas
$x_2^2$	$SC_{x_2^2}$	$GL_{x_2^2}$	$CM_{x_2^2}$	$F = \frac{CM_{x_2^2}}{CM_R}$	F-valor > Ftablas
$x_3^2$	$SC_{x_3^2}$	$GL_{x_3^2}$	$CM_{x_3^2}$	$F = \frac{CM_{x_3^2}}{CM_R}$	F-valor > Ftablas
Residual	$SC_R$	$GL_R$	$CM_R$		
Falta de ajuste	$SC_{FA}$	$GL_{FA}$	$CM_{FA}$	$F = \frac{CM_{FA}}{CM_R}$	F-valor < Ftablas
Error puro	$SC_{EP}$	$GL_{EP}$	$CM_{EP}$		
Total	$SC_T$	$GL_T$			

**PARA LA REMOCIÓN DE PLOMO**

▪ **CÁLCULO DE LA SUMA DE CUADRADOS (SC)**

- *Cálculo de la suma de cuadrados del modelo ( $SC_{Modelo}$ ):* Según la ecuación

tenemos:



$$SC_{Modelo} = SC_{Lineal} + SC_{\substack{\text{Interacciones} \\ \text{de 2 términos}}} + SC_{\substack{\text{Interacciones} \\ \text{cuadráticas}}}$$

- Cálculo de la suma de cuadrados lineal ( $SC_{x_i}$ ): Utilizando las ecuaciones tenemos:

$$SC_{x_1} = \frac{\left( \sum_{i=1}^N x_i y_i \right)^2}{\sum_{i=1}^N x_i^2} = \frac{[(-1 \times 46,40) + \dots + (0 \times 83,81)]^2}{(-1)^2 + \dots + (0)^2} = 842,17$$

$$SC_{x_2} = \frac{\left( \sum_{i=1}^N x_i y_i \right)^2}{\sum_{i=1}^N x_i^2} = \frac{[(-1 \times 46,40) + \dots + (0 \times 83,81)]^2}{(-1)^2 + \dots + (0)^2} = 390,56$$

$$SC_{x_3} = \frac{\left( \sum_{i=1}^N x_i y_i \right)^2}{\sum_{i=1}^N x_i^2} = \frac{[(-1 \times 46,40) + \dots + (0 \times 83,81)]^2}{(-1)^2 + \dots + (0)^2} = 1607,48$$

- Cálculo de la suma de cuadrados de las interacciones de 2 términos ( $SC_{x_i x_j}$ ): Empleando las ecuaciones tenemos:

$$SC_{x_1 x_2} = \frac{\left( \sum_{i=1, j=1}^N (x_i x_j) y_i \right)^2}{\sum_{i=1, j=1}^N (x_i x_j)^2} = \frac{[(1 \times 46,40) + \dots + (0 \times 83,81)]^2}{(+1)^2 + \dots + (0)^2} = 1,95$$

$$SC_{x_1 x_3} = \frac{\left( \sum_{i=1, j=1}^N (x_i x_j) y_i \right)^2}{\sum_{i=1, j=1}^N (x_i x_j)^2} = \frac{[(1 \times 46,40) + \dots + (0 \times 83,81)]^2}{(+1)^2 + \dots + (0)^2} = 29,92$$



$$SC_{x_2x_3} = \frac{\left( \sum_{i=1, j=1}^N (x_i x_j) y_i \right)^2}{\sum_{i=1, j=1}^N (x_i x_j)^2} = \frac{[(1x46, 40) + \dots + (0x83, 81)]^2}{(+1)^2 + \dots + (0)^2} = 56,34$$

- Cálculo de la suma de cuadrados de las interacciones cuadráticas ( $SCx_i^2$ ):

Empleando las ecuaciones tenemos:

$$SC_{x_i^2} = \frac{(\beta_{ii})^2}{E}$$

Donde E es la diagonal de  $(X'X)^{-1}$ .

$$SC_{x_1^2} = \frac{(-4, 25)^2}{0,089} = 203$$

$$SC_{x_2^2} = \frac{(-4, 37)^2}{0,089} = 215$$

$$SC_{x_3^2} = \frac{(-3, 74)^2}{0,089} = 157$$

$$SC_{Modelo} = (842,17 + 390,56 + 1607,48) + (1,95 + 29,92 + 56,34) + (203 + 215 + 157)$$

$$SC_{Modelo} = 3292,72$$

- Cálculo de la suma de cuadrados del total ( $SC_T$ ): Según la ecuación para un número total de experimentos igual a 17 ( $N = 17$ ) tenemos:



$$SC_T = \sum_{i=1}^N y_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^N y_i\right)^2}{N_T}$$

$$SC_T = \left[(46,40)^2 + \dots + (83,81)^2\right] - \frac{[46,40 + \dots + 83,81]^2}{17} = 3326,80$$

- *Cálculo de la suma de cuadrados del residual (SC<sub>R</sub>):* Según la ecuación tenemos:

$$SC_R = SC_T - SC_{Modelo}$$

$$SC_R = 3326,80 - 3292,72 = 34,08$$

- o Cálculo de la suma de cuadrados del error puro (SC<sub>EP</sub>) según la ecuación para un número de réplicas en el centro igual a 3 ( $n_0 = 3$ ):

$$SC_{EP} = \sum_{i=1}^{n_0} \left(Y_i^0 - \bar{Y}^0\right)^2$$

$$SC_{EP} = (83,81 - 83,22)^2 + (82,05 - 83,22)^2 + (83,81 - 83,22)^2$$

$$SC_{EP} = 2,07$$

- o Cálculo de la suma de cuadrados de la falta de ajuste (GL<sub>FA</sub>) aplicando la ecuación es igual a:

$$SC_{FA} = SC_R - SC_{EP} = 34,08 - 2,07 = 32,01$$

## ▪ CÁLCULO DE LOS GRADOS DE LIBERTAD (GL)

- *Cálculo de los grados de libertad del modelo (GL<sub>M</sub>):* Según la ecuación tenemos:

$$GL_{Modelo} = GL_{Lineal} + GL_{\substack{\text{Interacciones} \\ \text{de 2 términos}}} + GL_{\substack{\text{Interacciones} \\ \text{cuadráticas}}}$$





- Cálculo de los grados de libertad lineal ( $GL_{\text{lineal}}$ ): Los efectos tienen 2 niveles, utilizando las ecuaciones tenemos:

$$GL_{x_1} = (a - 1) = 2 - 1 = 1$$

$$GL_{x_2} = (b - 1) = 2 - 1 = 1$$

$$GL_{x_3} = (c - 1) = 2 - 1 = 1$$

$$GL_{\text{Lineal}} = \sum GL_{x_i} = 1 + 1 + 1 = 3$$

- Cálculo de los grados de libertad de las interacciones de 2 términos ( $GL_{\text{interacciones de 2 términos}}$ ): Empleando las siguientes ecuaciones tenemos:

$$GL_{x_1x_2} = (a - 1)(b - 1) = (2 - 1)(2 - 1) = 1$$

$$GL_{x_1x_3} = (a - 1)(c - 1) = (2 - 1)(2 - 1) = 1$$

$$GL_{x_2x_3} = (b - 1)(c - 1) = (2 - 1)(2 - 1) = 1$$

$$GL_{\text{Interacciones de 2 términos}} = \sum GL_{x_i x_j} = 1 + 1 + 1 = 3$$

- Cálculo de los grados de libertad de las interacciones de 3 términos ( $GL_{\text{interacciones cuadráticas}}$ ): Empleando las siguientes ecuaciones tenemos:

$$GL_{x_1^2} = (a - 1)(a - 1) = (2 - 1)(2 - 1) = 1$$

$$GL_{x_2^2} = (b - 1)(b - 1) = (2 - 1)(2 - 1) = 1$$

$$GL_{x_3^2} = (c - 1)(c - 1) = (2 - 1)(2 - 1) = 1$$

$$GL_{\text{Interacciones cuadráticas}} = \sum GL_{x_i^2} = 3$$



$$GL_{Modelo} = GL_{Lineal} + GL_{\substack{\text{Interacciones} \\ \text{de 2 términos}}} + GL_{\substack{\text{Interacciones} \\ \text{cuadráticas}}} = 3 + 3 + 3 = 9$$

- *Cálculo de los grados de libertad del total (GL<sub>T</sub>):* El número total de experimentos igual a 17 (N = 17) tenemos:

$$GL_T = N - 1 = 17 - 1 = 16$$

- *Cálculo de los grados de libertad del residual (GL<sub>R</sub>):* Empleando la ecuación tenemos:

$$GL_R = N - N_{\substack{\text{términos} \\ \text{ecuación}}} = 17 - 10 = 7$$

- o Cálculo de los grados de libertad de la falta de ajuste (GL<sub>FA</sub>): Aplicando la ecuación es igual a:

$$GL_{FA} = N_{\substack{\text{niveles} \\ \text{diseño}}} - N_{\substack{\text{términos} \\ \text{ecuación}}} = 15 - 10 = 5$$

- o Cálculo de los grados de libertad del error puro (GL<sub>EP</sub>): Para un número de réplicas en el centro igual a 3 (n<sub>0</sub> = 3):

$$GL_{EP} = n_0 - 1 = 3 - 1 = 2$$

#### ▪ CÁLCULO DEL CUADRADO MEDIO (CM)

- *Cálculo del cuadrado medio del modelo (CM<sub>Modelo</sub>):* Según la ecuación tenemos:

$$CM_{Modelo} = \frac{SC_{Modelo}}{GL_{Modelo}} = \frac{3292,72}{9} = 365,86$$

- o Cálculo del cuadrado medio de los efectos lineales (CM<sub>xi</sub>): Utilizando las ecuaciones:



$$CM_{x_1} = \frac{SC_{x_1}}{GL_{x_1}} = \frac{842,17}{1} = 842,17$$

$$CM_{x_2} = \frac{SC_{x_2}}{GL_{x_2}} = \frac{390,56}{1} = 390,56$$

$$CM_{x_3} = \frac{SC_{x_3}}{GL_{x_3}} = \frac{1607,48}{1} = 1607,48$$

- Cálculo del cuadrado medio de las interacciones de 2 términos ( $CM_{x_i x_j}$ ):

Empleando las ecuaciones:

$$CM_{x_1 x_2} = \frac{SC_{x_1 x_2}}{GL_{x_1 x_2}} = \frac{1,95}{1} = 1,95$$

$$CM_{x_1 x_3} = \frac{SC_{x_1 x_3}}{GL_{x_1 x_3}} = \frac{29,92}{1} = 29,92$$

$$CM_{x_2 x_3} = \frac{SC_{x_2 x_3}}{GL_{x_2 x_3}} = \frac{56,34}{1} = 56,34$$

- Cálculo del cuadrado medio de las interacciones de cuadráticas ( $CM_{x_i^2}$ ):

Empleando las ecuaciones:

$$CM_{x_1^2} = \frac{SC_{x_1^2}}{GL_{x_1^2}} = \frac{203,26}{1} = 203,26$$

$$CM_{x_2^2} = \frac{SC_{x_2^2}}{GL_{x_2^2}} = \frac{215,63}{1} = 215,63$$

$$CM_{x_3^2} = \frac{SC_{x_3^2}}{GL_{x_3^2}} = \frac{157,44}{1} = 157,44$$

-



- *Cálculo del cuadrado medio del residual ( $SC_R$ ), cuadrado medio de la falta de ajuste ( $CM_{FA}$ ) y cuadrado medio del error puro ( $CM_{EP}$ ): Según las ecuaciones tenemos:*

$$CM_R = \frac{SC_R}{GL_R} = \frac{34,08}{7} = 4,87$$

$$CM_{FA} = \frac{SC_{FA}}{GL_{FA}} = \frac{32,02}{5} = 6,40$$

$$CM_{EP} = \frac{SC_{EP}}{GL_{EP}} = \frac{2,07}{2} = 1,03$$

#### ▪ **CÁLCULO DEL ESTADISTICO FISHER ( $F_0$ )**

- *Cálculo del estadístico Fisher para el modelo: Según la ecuación tenemos:*

$$F(\text{Modelo}) = \frac{CM_{\text{Modelo}}}{CM_R} = \frac{365,86}{4,87} = 75,14$$

- Cálculo del estadístico Fisher para el lineal, efectos lineales, interacción de 2 términos e interacción cuadráticas:

$$F(x_1) = \frac{CM_{x_1}}{CM_R} = \frac{842,17}{4,87} = 172,96$$

$$F(x_2) = \frac{CM_{x_2}}{CM_R} = \frac{842,17}{4,87} = 172,96$$

$$F(x_3) = \frac{CM_{x_3}}{CM_R} = \frac{390,56}{4,87} = 80,21$$

$$F(x_1x_2) = \frac{CM_{x_1x_2}}{CM_R} = \frac{1,95}{4,87} = 0,40$$



$$F(x_1x_3) = \frac{CM_{x_1x_3}}{CM_R} = \frac{29,92}{4,87} = 6,14$$

$$F(x_2x_3) = \frac{CM_{x_2x_3}}{CM_R} = \frac{56,34}{4,87} = 11,57$$

$$F(x_1^2) = \frac{CM_{x_1^2}}{CM_R} = \frac{203,26}{4,87} = 41,75$$

$$F(x_2^2) = \frac{CM_{x_2^2}}{CM_R} = \frac{215,63}{4,87} = 44,29$$

$$F(x_3^2) = \frac{CM_{x_3^2}}{CM_R} = \frac{157,44}{4,87} = 32,34$$

- *Cálculo del estadístico Fisher para la falta de ajuste:* Según la ecuación tenemos:

$$F(\text{Falta de ajuste}) = \frac{CM_{FA}}{CM_{EP}} = \frac{6,40}{1,03} = 6,20$$

## PARA LA REMOCIÓN DE LA TURBIEDAD

### ▪ CÁLCULO DE LA SUMA DE CUADRADOS (SC)

- *Cálculo de la suma de cuadrados del modelo ( $SC_{Modelo}$ ):* Según la ecuación tenemos:

$$SC_{Modelo} = SC_{Lineal} + SC_{\substack{\text{Interacciones} \\ \text{de 2 términos}}} + SC_{\substack{\text{Interacciones} \\ \text{cuadráticas}}}$$

- Cálculo de la suma de cuadrados lineal ( $SC_{xi}$ ): Utilizando las ecuaciones tenemos:



$$SC_{x_1} = \frac{\left( \sum_{i=1}^N x_i y_i \right)^2}{\sum_{i=1}^N x_i^2} = \frac{[(-1 \times 50,92) + \dots + (0 \times 93,20)]^2}{(-1)^2 + \dots + (0)^2} = 1023,10$$

$$SC_{x_2} = \frac{\left( \sum_{i=1}^N x_i y_i \right)^2}{\sum_{i=1}^N x_i^2} = \frac{[(-1 \times 50,92) + \dots + (0 \times 93,20)]^2}{(-1)^2 + \dots + (0)^2} = 712,38$$

$$SC_{x_3} = \frac{\left( \sum_{i=1}^N x_i y_i \right)^2}{\sum_{i=1}^N x_i^2} = \frac{[(-1 \times 50,92) + \dots + (0 \times 93,20)]^2}{(-1)^2 + \dots + (0)^2} = 844,44$$

- Cálculo de la suma de cuadrados de las interacciones de 2 términos

( $SC_{x_i x_j}$ ): Empleando las ecuaciones tenemos:

$$SC_{x_1 x_2} = \frac{\left( \sum_{i=1, j=1}^N (x_i x_j) y_i \right)^2}{\sum_{i=1, j=1}^N (x_i x_j)^2} = \frac{[(1 \times 50,92) + \dots + (0 \times 93,20)]^2}{(+1)^2 + \dots + (0)^2} = 11,33$$

$$SC_{x_1 x_3} = \frac{\left( \sum_{i=1, j=1}^N (x_i x_j) y_i \right)^2}{\sum_{i=1, j=1}^N (x_i x_j)^2} = \frac{[(1 \times 50,92) + \dots + (0 \times 93,20)]^2}{(+1)^2 + \dots + (0)^2} = 28,88$$

$$SC_{x_2 x_3} = \frac{\left( \sum_{i=1, j=1}^N (x_i x_j) y_i \right)^2}{\sum_{i=1, j=1}^N (x_i x_j)^2} = \frac{[(1 \times 50,92) + \dots + (0 \times 93,20)]^2}{(+1)^2 + \dots + (0)^2} = 0,94$$

- Cálculo de la suma de cuadrados de las interacciones cuadráticas ( $SC_{x_i^2}$ ):

Empleando las ecuaciones tenemos:



$$SC_{x_i^2} = \frac{(\beta_{ii})^2}{E}$$

Donde E es la diagonal de  $(X'X)^{-1}$ .

$$SC_{x_1^2} = \frac{(-5,91)^2}{0,089} = 392$$

$$SC_{x_2^2} = \frac{(-4,20)^2}{0,089} = 198$$

$$SC_{x_3^2} = \frac{(-4,31)^2}{0,089} = 209$$

$$SC_{Modelo} = (1023,10 + 712,38 + 844,44) + (11,33 + 28,88 + 0,94) + (392 + 198 + 209)$$

$$SC_{Modelo} = 3141,54$$

- *Cálculo de la suma de cuadrados del total ( $SC_T$ ):* Según la ecuación para un número total de experimentos igual a 17 ( $N = 17$ ) tenemos:

$$SC_T = \sum_{i=1}^N y_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^N y_i\right)^2}{N_T}$$

$$SC_T = \left[(50,92)^2 + \dots + (93,20)^2\right] - \frac{[50,92 + \dots + 93,20]^2}{17} = 3155,47$$

- *Cálculo de la suma de cuadrados del residual ( $SC_R$ ):* Según la ecuación tenemos:

$$SC_R = SC_T - SC_{Modelo}$$

$$SC_R = 3155,47 - 3141,54 = 13,93$$



- Cálculo de la suma de cuadrados del error puro ( $SC_{EP}$ ) según la ecuación para un número de réplicas en el centro igual a 3 ( $n_0 = 3$ ):

$$SC_{EP} = \sum_{i=1}^{n_0} (Y_i^0 - \bar{Y}^0)^2$$

$$SC_{EP} = (92,12 - 92,59)^2 + (92,46 - 92,59)^2 + (93,20 - 92,59)^2$$

$$SC_{EP} = 0,61$$

- Cálculo de la suma de cuadrados de la falta de ajuste ( $GL_{FA}$ ) aplicando la ecuación es igual a:

$$SC_{FA} = SC_R - SC_{EP} = 13,93 - 0,61 = 13,32$$

#### ▪ CÁLCULO DE LOS GRADOS DE LIBERTAD (GL)

- *Cálculo de los grados de libertad del modelo ( $GL_M$ ):* Según la ecuación tenemos:

$$GL_{Modelo} = GL_{Lineal} + GL_{\substack{\text{Interacciones} \\ \text{de 2 términos}}} + GL_{\substack{\text{Interacciones} \\ \text{cuadráticas}}}$$

- Cálculo de los grados de libertad lineal ( $GL_{lineal}$ ): Los efectos tienen 2 niveles, utilizando las ecuaciones tenemos:

$$GL_{x_1} = (a - 1) = 2 - 1 = 1$$

$$GL_{x_2} = (b - 1) = 2 - 1 = 1$$

$$GL_{x_3} = (c - 1) = 2 - 1 = 1$$

$$GL_{Lineal} = \sum GL_{x_i} = 1 + 1 + 1 = 3$$

- Cálculo de los grados de libertad de las interacciones de 2 términos ( $GL_{interacciones \text{ de 2 términos}}$ ): Empleando las siguientes ecuaciones tenemos:





$$GL_{x_1x_2} = (a-1)(b-1) = (2-1)(2-1) = 1$$

$$GL_{x_1x_3} = (a-1)(c-1) = (2-1)(2-1) = 1$$

$$GL_{x_2x_3} = (b-1)(c-1) = (2-1)(2-1) = 1$$

$$GL_{\substack{\text{Interacciones} \\ \text{de 2 términos}}} = \sum GL_{x_i x_j} = 1+1+1 = 3$$

- Cálculo de los grados de libertad de las interacciones de 3 términos

( $GL_{\text{interacciones cuadráticas}}$ ): Empleando las siguientes ecuaciones tenemos:

$$GL_{x_1^2} = (a-1)(a-1) = (2-1)(2-1) = 1$$

$$GL_{x_2^2} = (b-1)(b-1) = (2-1)(2-1) = 1$$

$$GL_{x_3^2} = (c-1)(c-1) = (2-1)(2-1) = 1$$

$$GL_{\substack{\text{Interacciones} \\ \text{cuadráticas}}} = \sum GL_{x_i^2} = 3$$

$$GL_{\text{Modelo}} = GL_{\text{Lineal}} + GL_{\substack{\text{Interacciones} \\ \text{de 2 términos}}} + GL_{\substack{\text{Interacciones} \\ \text{cuadráticas}}} = 3+3+3 = 9$$

- *Cálculo de los grados de libertad del total ( $GL_T$ ):* El número total de experimentos igual a 17 ( $N = 17$ ) tenemos:

$$GL_T = N - 1 = 17 - 1 = 16$$

- *Cálculo de los grados de libertad del residual ( $GL_R$ ):* Empleando la ecuación tenemos:

$$GL_R = N - N_{\substack{\text{términos} \\ \text{ecuación}}} = 17 - 10 = 7$$



- Cálculo de los grados de libertad de la falta de ajuste ( $GL_{FA}$ ): Aplicando la ecuación es igual a:

$$GL_{FA} = N_{\substack{\text{niveles} \\ \text{diseño}}} - N_{\substack{\text{términos} \\ \text{ecuación}}} = 15 - 10 = 5$$

- Cálculo de los grados de libertad del error puro ( $GL_{EP}$ ): Para un número de réplicas en el centro igual a 3 ( $n_0 = 3$ ):

$$GL_{EP} = n_0 - 1 = 3 - 1 = 2$$

#### ▪ CÁLCULO DEL CUADRADO MEDIO (CM)

- *Cálculo del cuadrado medio del modelo ( $CM_{Modelo}$ ):* Según la ecuación tenemos:

$$CM_{Modelo} = \frac{SC_{Modelo}}{GL_{Modelo}} = \frac{3141,54}{9} = 349,06$$

- Cálculo del cuadrado medio de los efectos lineales ( $CM_{xi}$ ): Utilizando las ecuaciones:

$$CM_{x_1} = \frac{SC_{x_1}}{GL_{x_1}} = \frac{1023,10}{1} = 1023,10$$

$$CM_{x_2} = \frac{SC_{x_2}}{GL_{x_2}} = \frac{712,38}{1} = 712,38$$

$$CM_{x_3} = \frac{SC_{x_3}}{GL_{x_3}} = \frac{844,44}{1} = 844,44$$

- Cálculo del cuadrado medio de las interacciones de 2 términos ( $CM_{xixj}$ ):

Empleando las ecuaciones:

$$CM_{x_1x_2} = \frac{SC_{x_1x_2}}{GL_{x_1x_2}} = \frac{11,33}{1} = 11,33$$



$$CM_{x_1x_3} = \frac{SC_{x_1x_3}}{GL_{x_1x_3}} = \frac{28,88}{1} = 28,88$$

$$CM_{x_2x_3} = \frac{SC_{x_2x_3}}{GL_{x_2x_3}} = \frac{0,94}{1} = 0,94$$

- Cálculo del cuadrado medio de las interacciones de cuadráticas ( $CMx_i^2$ ):

Empleando las ecuaciones:

$$CM_{x_1^2} = \frac{SC_{x_1^2}}{GL_{x_1^2}} = \frac{393,77}{1} = 393,77$$

$$CM_{x_2^2} = \frac{SC_{x_2^2}}{GL_{x_2^2}} = \frac{198,76}{1} = 198,76$$

$$CM_{x_3^2} = \frac{SC_{x_3^2}}{GL_{x_3^2}} = \frac{209,44}{1} = 209,44$$

-

- *Cálculo del cuadrado medio del residual ( $SC_R$ ), cuadrado medio de la falta de ajuste ( $CM_{FA}$ ) y cuadrado medio del error puro ( $CM_{EP}$ ):* Según las ecuaciones tenemos:

$$CM_R = \frac{SC_R}{GL_R} = \frac{13,93}{7} = 1,99$$

$$CM_{FA} = \frac{SC_{FA}}{GL_{FA}} = \frac{13,32}{5} = 2,66$$

$$CM_{EP} = \frac{SC_{EP}}{GL_{EP}} = \frac{0,61}{2} = 0,30$$

#### ▪ CÁLULO DEL ESTADISTICO FISHER ( $F_0$ )

- *Cálculo del estadístico Fisher para el modelo:* Según la ecuación tenemos:



$$F(\text{Modelo}) = \frac{CM_{\text{Modelo}}}{CM_R} = \frac{349,06}{1,99} = 175,38$$

- Cálculo del estadístico Fisher para el lineal, efectos lineales, interacción de 2 términos e interacción cuadráticas:

$$F(x_1) = \frac{CM_{x_1}}{CM_R} = \frac{1023,10}{1,99} = 514,04$$

$$F(x_2) = \frac{CM_{x_2}}{CM_R} = \frac{712,38}{1,99} = 357,92$$

$$F(x_3) = \frac{CM_{x_3}}{CM_R} = \frac{844,44}{1,99} = 424,28$$

$$F(x_1x_2) = \frac{CM_{x_1x_2}}{CM_R} = \frac{11,33}{1,99} = 5,69$$

$$F(x_1x_3) = \frac{CM_{x_1x_3}}{CM_R} = \frac{28,88}{1,99} = 14,51$$

$$F(x_2x_3) = \frac{CM_{x_2x_3}}{CM_R} = \frac{0,94}{1,99} = 0,47$$

$$F(x_1^2) = \frac{CM_{x_1^2}}{CM_R} = \frac{393,77}{1,99} = 197,85$$

$$F(x_2^2) = \frac{CM_{x_2^2}}{CM_R} = \frac{198,76}{1,99} = 99,86$$

$$F(x_3^2) = \frac{CM_{x_3^2}}{CM_R} = \frac{209,44}{1,99} = 105,23$$

- Cálculo del estadístico Fisher para la falta de ajuste: Según la ecuación tenemos:



$$F(\text{Falta de ajuste}) = \frac{CM_{FA}}{CM_{EP}} = \frac{2,66}{0,30} = 8.74$$

**ANEXO 9.** Cuadro de Matriz de Consistencia.

**TÍTULO: REMOCIÓN DE PLOMO Y TURBIDEZ CON PENCA DE TUNA (*Opuntia ficus-indica* (L.) Miller) Y POLIACRILAMIDA EN AGUAS CON RELAVES MINEROS DEL LAGO COMUNI LA RINCONADA**

PROBLEMAS		HIPÓTESIS	OBJETIVOS	VARIABLES E INDICADORES			
<p><b>Problema General</b></p> <p>¿Cuál es la eficiencia de la <i>Opuntia ficus-indica</i> (L.) Miller y poliacrilamida para la remoción de plomo y turbidez de aguas con relaves mineros del lago Comuni en el centro poblado La Rinconada?</p> <p><b>Problemas Específicas</b></p> <p>1. ¿Cuál será las características físico químicas y la concentración inicial de plomo y turbidez en aguas con relaves mineros del lago Comuni?</p>		<p><b>Hipótesis General</b></p> <p>El uso de <i>Opuntia ficus-indica</i> (L.) Miller y poliacrilamida constituye una alternativa eficiente para la remoción plomo y turbidez de aguas con relaves mineros del lago Comuni en el centro poblado La Rinconada.</p> <p><b>Hipótesis Específicas</b></p> <p>1. Las características físico químicas de las aguas del lago Comuni corresponden a un agua con temperatura, pH</p>	<p><b>Objetivo General</b></p> <p>Determinar la eficiencia de la penca de tuna (<i>Opuntia ficus-indica</i> (L.) Miller) y poliacrilamida en la remoción de plomo y turbidez de las aguas con relaves mineros del lago Comuni en el centro poblado La Rinconada.</p> <p><b>Objetivos Específicos</b></p> <p>1. Determinar las características físico químicas y la</p>	<p><b>TIPO DE VARIABLES</b></p> <p>Independiente 1</p> <p>Independiente 2</p> <p>Independiente 3</p>	<p><b>VARIABLE</b></p> <p>Concentración de penca de tuna - <i>Opuntia ficus-indica</i> (L.) Miller</p> <p>Concentración de poliacrilamida</p> <p>Tiempo de sedimentación</p>	<p><b>DIMENSIONES</b></p> <p>Baja</p> <p>Intermedia</p> <p>Alta</p> <p>Baja</p> <p>Intermedia</p> <p>Alta</p> <p>Baja</p> <p>Intermedia</p>	<p><b>INDICADORES</b></p> <p>mg.L<sup>-1</sup> de coagulante</p> <p>mg.L<sup>-1</sup> de floculante</p> <p>rpm</p>
<b>TABLA DE OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES</b>							

<p>2. ¿Cuáles es el efecto de las concentraciones de <i>Opuntia ficus-indica</i> (L.) Miller y poliacrilamida en la remoción de plomo y turbidez de aguas con relaves mineros del lago Comuni en el centro poblado La Rinconada?</p> <p>3. ¿Cuál es el porcentaje de remoción de plomo y turbidez de aguas con relaves mineros del lago Comuni con las concentraciones óptimas de <i>Opuntia ficus-indica</i> (L.) Miller y poliacrilamida en el centro poblado La Rinconada?</p>	<p>ácido, turbia y con presencia de plomo</p> <p>2. El estudio exploratorio mostrara que existen concentraciones de <i>Opuntia ficus-indica</i> (L.) Miller y poliacrilamida que permiten remover plomo y la turbidez de aguas con relaves mineros del lago Comuni en el centro poblado La Rinconada.</p> <p>3. Se obtendrá un porcentaje significativo de remoción de plomo y turbidez de las aguas con relaves mineros del lago Comuni, con la concentración óptima de <i>Opuntia ficus-indica</i> (L.) Miller y poliacrilamida.</p>	<p>concentración de plomo y turbidez presentes en aguas con relaves mineros del lago Comuni del centro poblado La Rinconada.</p> <p>2. Realizar un estudio exploratorio del efecto de las concentraciones de <i>Opuntia ficus-indica</i> (L.) Miller y poliacrilamida en la remoción de plomo y turbidez de aguas con relaves mineros del lago Comuni en el centro poblado La Rinconada.</p> <p>3. Determinar la concentración óptima de la penca de tuna (<i>Opuntia ficus-indica</i> (L.) Miller) y poliacrilamida para hallar el porcentaje de remoción de plomo y turbidez de las</p>	<p>Dependiente 1</p> <p>Dependiente 2</p>	<p>Alta</p> <p>Concentración de plomo</p> <p>Turbidez del agua</p>	<p>ppm de Pb</p> <p>Concentración inicial</p> <p>Concentración final</p> <p>Turbidez inicial</p> <p>Turbidez final</p> <p>NTU (Unidades Nefelométricas de Turbidez)</p>
---	--	---	---	--	---



		aguas con relaves mineros del lago Comuni.	





## ANEXO 10. 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 KEAVY LINDSAY PAYE ZUNI  
identificado con DNI 75806259 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:  
" REMOCIÓN DE PLOMO Y TURBIDEZ CON PENCA DE TUNA  
(Opuntia ficus indica (L.) Miller) Y POLIACRILAMIDA EN AGUAS  
CON RELAVES MINEROS DEL LAGO COMUNI LA RINCONADA "

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 11. 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 KEAVY LINDSAY DAYE ZUNI  
identificado con DNI 75806259 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:  
RENOCIÓN DE PLOMO Y TURBIDEZ CON PENCA DE TUNA (Opuntia ficus indica (L.) Miller) Y POLIACRILAMIDA EN AGUAS CON RELAVES MINEROS DEL LAGO COMUNI LA RINCONADA

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, visite: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

En señal de conformidad, suscribo el presente documento.

Puno 17 de DICIEMBRE del 2024

  
FIRMA (obligatoria)

  
Huella