



UNIVERSIDAD NACIONAL DE JULIACA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y
FORESTAL



EFICACIA DEL ÓXIDO DE CALCIO Y SULFATO DE
ALUMINIO EN LA REDUCCIÓN DE MATERIA ORGÁNICA
EN LACTOSUEROS DE LLALLI, MELGAR

Bach. Kelley Yesica Valencia Tito

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE
INGENIERO AMBIENTAL Y FORESTAL

Asesor: Dr. Godofredo Huanca Chambi



Juliaca - 2026

UNIVERSIDAD NACIONAL DE JULIACA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y
FORESTAL



EFICACIA DEL ÓXIDO DE CALCIO Y SULFATO DE ALUMINIO EN
LA REDUCCIÓN DE MATERIA ORGÁNICA EN LACTOSUEROS DE
LLALLI, MELGAR

Bach. Kelley Yesica Valencia Tito

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE
INGENIERO AMBIENTAL Y FORESTAL

Asesor: Dr. Godofredo Huanca Chambi

Juliaca, 2026

FICHA CARTOGRÁFICA

Valencia, K. Y. (2026). *Eficacia del óxido de calcio y sulfato de aluminio en la reducción de materia orgánica en lactosueros de Llalli, Melgar.*

(Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Juliaca.

Autor: Kelley Yesica Valencia Tito

Título: Eficacia del óxido de calcio y sulfato de aluminio en la reducción de materia orgánica en lactosueros de Llalli, Melgar

Publicación: Juliaca, 2026

Descripción: Cantidad de páginas (109 páginas)

Nota: Tesis - Escuela profesional de Ingeniería Ambiental y Forestal - Universidad Nacional de Juliaca

Código: 01-000083-01/Y29

Nota: Incluye bibliografía

Asesor: Dr. Godofredo Huanca Chambi

Palabras clave: Coagulación, floculación, lactosueros, materia orgánica, óxido de calcio, sulfato de aluminio.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE JULIACA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y
FORESTAL

“EFICACIA DEL ÓXIDO DE CALCIO Y SULFATO DE ALUMINIO EN
LA REDUCCIÓN DE MATERIA ORGÁNICA EN LACTOSUEROS DE
LLALLI, MELGAR”

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO AMBIENTAL Y
FORESTAL

Presentado por:

Bach. Kelley Yesica Valencia Tito

Sustentada y aprobada ante el siguiente jurado:

Mg. Milton Quispe Tisnado

PRESIDENTE DE JURADO

Mg. Cesar Enrique Yupanqui Bendita

JURADO (secretario)

Mg. Percy Fredy Quilla Coila

JURADO (Vocal)

2° MIEMBRO

3° MIEMBRO

Dr. Godofredo Huanca Chambi

ASESOR DE TESIS

Kelley Yesica Valencia Tito

EFICACIA DEL ÓXIDO DE CALCIO Y SULFATO DE ALUMINIO EN LA REDUCCIÓN DE MATERIA ORGÁNICA EN LACTOSUERO...

 Universidad Nacional de Juliaca

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::3117:622303888

Fecha de entrega

9 sep 2026, 2:37 p.m. GMT-5

Fecha de descarga

9 sep 2026, 2:42 p.m. GMT-5

Nombre del archivo

Informe de tesis Bachiller Kelley Valencia corregido.pdf

Tamaño del archivo

2.3 MB

112 páginas

21.359 palabras

123.724 caracteres



Firmado digitalmente por AQUINO
LARICO Elmer Rodrigo FAU
20448261272 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 09.09.2026 14:43:45 -05:00

15% 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 10 palabras)

Fuentes principales

- 11%  Fuentes de Internet
- 2%  Publicaciones
- 13%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

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.



Firmado digitalmente por AQUINO
LARICO Elmer Rodrigo FAU
20448261272 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 09.09.2026 14:44:04 -05:00

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a papá y mamá, Ricardo y Fortunata, por su entrega amorosa, su apoyo constante y la responsabilidad con la que guían cada paso de mi vida. Contenta porque son unos padres presentes, los admiro, respeto y amo mucho.

A mis hermanos Ricardo, Lenin y Arturo, por su respaldo, cariño, complicidad y compañía sincera. Son mis compañeros de vida, con quienes compartimos y celebramos juntos nuestros éxitos.

A la memoria de mi hermano Richar, a quien extraño y llevo conmigo cada día de mi vida.

Y a mi tío abuelo Eugenio Valencia, por su afecto fiel. A quien quiero mucho, admiro y respeto, y cuya presencia me acompaña desde que nací.

Que estas páginas reflejen el agradecimiento profundo que siento por todos ellos y honren la fe, la familia y los valores que sostienen mi vida.

Kelley Yesica Valencia Tito

AGRADECIMIENTO

A Dios, en quien tengo mucha fe. Por regalarme la vida, iluminar cada etapa de mi camino y concederme la sabiduría, fortaleza y la familia que sostienen mis logros.

A mis amigas Elian Maydee y Mery Yolanda, por su cercanía y ánimos que hicieron más ligero este recorrido.

A la Universidad Nacional de Juliaca y a la Escuela Profesional de ingeniería ambiental y forestal, por brindarme los recursos y espacios que hicieron posible mi formación académica.

A mi asesor de tesis, Dr. Godofredo Huanca Chambi, por su acompañamiento, instrucciones, correcciones y revisiones que hizo durante el desarrollo de esta investigación.

A los miembros del jurado, por sus valiosos aportes, tiempo en las revisiones y correcciones. Gracias por sus instrucciones.

Kelley Yesica Valencia Tito

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTO.....	ii
ÍNDICE GENERAL	iii
ÍNDICE DE TABLAS	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
ÍNDICE DE ANEXOS	x
LISTA DE ABREVIATURAS.....	xi
RESUMEN	12
ABSTRACT	13
INTRODUCCIÓN	14

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Formulación del problema	16
1.1.1. Problema general	17
1.1.2. Problemas específicos	17
1.2. Objetivos de la investigación	18
1.2.1. Objetivo general	18
1.2.2. Objetivos específicos.....	18
1.3. Hipótesis de la investigación	18
1.3.1. Hipótesis general	18
1.3.2. Hipótesis específicas	18
1.4. Justificación de la investigación	19
1.4.1. Justificación ambiental	19
1.4.2. Justificación social.....	19
1.4.3. Justificación económica.....	20
1.5. Variables	20
1.5.1. Descripción de variables analizadas.....	20

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Antecedentes	21
2.1.1. Antecedentes internacionales	21

2.1.2. Antecedentes nacionales.....	24
2.1.3. Antecedentes regionales	25
2.2. Marco teórico	26
2.2.1. Industria quesera.....	26
2.2.2. Lactosuero	27
2.2.3. Composición del lactosuero	28
2.2.4. Características fisicoquímicas del lactosuero	29
2.2.5. Impacto ambiental del lactosuero	31
2.2.6. Tratamiento de lactosueros.....	32
2.2.7. Óxido de Calcio.....	36
2.2.8. Sulfato de aluminio.....	37
2.2.9. Prueba de jarras	38

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Ámbito de estudio	41
3.2. Tipo, nivel, enfoque y diseño de investigación.....	42
3.2.1. Tipo de investigación	42
3.2.2. Nivel de investigación	42
3.2.3. Enfoque de investigación	42
3.2.4. Diseño de la investigación.....	43
3.3. Técnicas e instrumentos	43
3.3.1. Técnicas	43
3.3.2. Instrumentos	43
3.4. Población y muestra.....	44
3.4.1. Población	44
3.4.2. Muestra	44
3.5. Equipos, materiales y reactivos.....	45
3.5.1. Equipos	45
3.5.2. Materiales	46
3.5.3. Reactivos	46
3.6. Procedimiento metodológico	46
3.6.1. Determinación de la concentración inicial de la materia orgánica, turbidez y sólidos suspendidos totales en los lactosueros generados en el distrito de Llalli.....	46
3.6.2. Evaluación de la dosis óptima de óxido de calcio y sulfato de aluminio para la reducción de la materia orgánica.....	51

3.6.3. Comparación de la eficacia del óxido de calcio y el sulfato de aluminio en la reducción de materia orgánica presente en los lactosueros generados en el distrito de Llalli.	56
3.7. Evaluación estadística	57
3.7.1. Metodología de análisis estadístico	57

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. Determinación de la concentración inicial de la materia orgánica, turbidez y sólidos suspendidos totales en los lactosueros generados en el distrito de Llalli.	58
4.2. Evaluación de la dosis óptima de óxido de calcio y sulfato de aluminio para la reducción de la materia orgánica	62
4.3. Comparación de la eficacia del óxido de calcio y el sulfato de aluminio en la reducción de materia orgánica presente en los lactosueros generados en el distrito de Llalli.	72
4.4. Prueba de hipótesis	74

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones	88
5.2. Recomendaciones	89
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	90
ANEXOS	96

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 Valores típicos de los parámetros fisicoquímicos del lactosuero	31
Tabla 2 Ubicación de los puntos de monitoreo de lactosuero en el distrito de Llalli.....	42
Tabla 3 Código y ubicación geográfica de los puntos de muestreo de lactosuero en el distrito de Llalli.....	47
Tabla 4 Métodos de ensayo utilizados para la determinación de los parámetros fisicoquímicos del lactosuero en el distrito de Llalli, 2025.....	50
Tabla 5 Dosis de CaO y $Al_2(SO_4)_3$ empleadas en el tratamiento fisicoquímico del lactosuero generado en el distrito de Llalli, 2025	53
Tabla 6 Condiciones de agitación y sedimentación aplicadas durante la prueba de jarras para el tratamiento del lactosuero generado en el distrito de Llalli, 2025.....	54
Tabla 7 Codificación de los tratamientos experimentales aplicados al lactosuero generado en el distrito de Llalli, 2025.	56
Tabla 8 Resultados de los parámetros fisicoquímicos iniciales del lactosuero generado en el distrito de Llalli, 2025	58
Tabla 9 Resultados de los parámetros fisicoquímicos obtenidos en la repetición 1 del tratamiento con CaO (2 g/L) y $Al_2(SO_4)_3$ en lactosuero generado en el distrito de Llalli, 2025	62
Tabla 10 Resultados de los parámetros fisicoquímicos obtenidos en la repetición 2 del tratamiento con CaO (2 g/L) y $Al_2(SO_4)_3$ en lactosuero generado en el distrito de Llalli, 2025	65
Tabla 11 Resultados de los parámetros fisicoquímicos obtenidos en la repetición 3 del tratamiento con CaO (2 g/L) y $Al_2(SO_4)_3$ en lactosuero generado en el distrito de Llalli, 2025	67
Tabla 12 Valores promedio de los parámetros fisicoquímicos obtenidos mediante el tratamiento con CaO (2 g/L) y $Al_2(SO_4)_3$ en lactosuero generado en el distrito de Llalli, 2025	69
Tabla 13 Porcentaje de reducción de los parámetros fisicoquímicos obtenidos mediante el tratamiento con CaO y $Al_2(SO_4)_3$ en lactosuero generado en el distrito de Llalli, 2025	72
Tabla 14 Resumen del modelo de regresión cuadrática para la reducción de SST mediante el tratamiento con $Al_2(SO_4)_3$ en lactosuero generado en el distrito de Llalli, 2025.....	74
Tabla 15 Coeficientes del modelo de regresión cuadrática de la dosis de $Al_2(SO_4)_3$ sobre los SST del lactosuero generado en el distrito de Llalli, 2025	75

Tabla 16 Resumen del modelo de regresión cuadrática para la reducción de la turbidez mediante el tratamiento con $Al_2(SO_4)_3$ en lactosuero generado en el distrito de Llalli, 2025	77
Tabla 17 Coeficientes del modelo de regresión cuadrática de la dosis de $Al_2(SO_4)_3$ sobre la turbidez del lactosuero generado en el distrito de Llalli, 2025	78
Tabla 18 Resumen del modelo de regresión cuadrática para la variación del pH mediante el tratamiento con $Al_2(SO_4)_3$ en lactosuero generado en el distrito de Llalli, 2025.....	79
Tabla 19 Coeficientes del modelo de regresión cuadrática de la dosis de $Al_2(SO_4)_3$ sobre el pH del lactosuero generado en el distrito de Llalli, 2025.....	79
Tabla 20 Resumen del modelo de regresión cuadrática para la reducción de la DQO mediante el tratamiento con $Al_2(SO_4)_3$ en lactosuero generado en el distrito de Llalli, 2025.....	82
Tabla 21 Coeficientes del modelo de regresión cuadrática de la dosis de $Al_2(SO_4)_3$ sobre la DQO del lactosuero generado en el distrito de Llalli, 2025	82
Tabla 22 Resumen del modelo de regresión cuadrática para la reducción de la DBO mediante el tratamiento con $Al_2(SO_4)_3$ en lactosuero generado en el distrito de Llalli, 2025.....	85
Tabla 23 Coeficientes del modelo de regresión cuadrática de la dosis de $Al_2(SO_4)_3$ sobre la DBO del lactosuero generado en el distrito de Llalli, 2025.	85
Tabla 24 Descripción de variables dependientes e independientes	96

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 Mapa de ubicación de las plantas queseras en Llalili (Puntos de muestreo)..	41
Figura 2 Toma de muestra en planta quesera artesanal	45
Figura 3 Recolección de muestras	47
Figura 4 Muestras para análisis físico y químico	48
Figura 5 Almacenamiento de muestras	49
Figura 6 Análisis físico y químico de las muestras de lactosueros	50
Figura 7 Muestra de lactosueros para tratamiento.....	52
Figura 8 Ajuste de pH en muestras de lactosueros	52
Figura 9 Lactosueros con $Al_2(SO_4)_3$ para tratamiento	53
Figura 10 Muestras de lactosueros para tratamiento	54
Figura 11 Análisis de lactosueros después del tratamiento	55
Figura 12 Análisis comparativo de parámetros en lactosueros según VMA.	61
Figura 13 Comparación de parámetros fisicoquímicos iniciales antes y después de lostratamientos.	70
Figura 14 Porcentaje de reducción de la materia orgánica, turbidez y SST.	74
Figura 15 Modelo de regresión cuadrática entre la dosis de $Al_2(SO_4)_3$ y los SST (mg/L)	76
Figura 16 Modelo de regresión cuadrática entre la dosis de $Al_2(SO_4)_3$ y la Turbidez (NTU).....	78
Figura 17 Modelo de regresión cuadrática entre la dosis de $Al_2(SO_4)_3$ y el pH	81
Figura 18 Modelo de regresión cuadrática entre la dosis de $Al_2(SO_4)_3$ y el DQO (mg/L)	84
Figura 19 Modelo de regresión cuadrática entre la dosis de $Al_2(SO_4)_3$ y el DBO (mg/L)	87
Figura 20 Primer punto de toma de muestras	97
Figura 21 Segundo punto de toma de muestras.....	97
Figura 22 Tercer punto de toma de muestras	98
Figura 23 Inicio de tratamiento de los lactosueros antes de a[aplicar los coagulantes	98
Figura 24 Medición de parámetros iniciales.....	99
Figura 25 Lactosueros después de aplicar los coagulates	99
Figura 26 Observación antes de medir parámetros después de los tratamientos.....	100

Figura 27 <i>Lactosuero después de los tratamientos</i>	100
Figura 28 <i>Observación del inicio de medición de los parámetros después de los tratamientos.....</i>	101
Figura 29 <i>Informe de resultados de laboratorio N.º LQ-11525A</i>	102
Figura 30 <i>Informe de resultados de laboratorio N.º LQ-11525A</i>	103
Figura 31 <i>Informe de resultados de laboratorio N.º LQ-11525B</i>	104
Figura 32 <i>Informe de resultados de laboratorio N.º LQ-11525B</i>	105
Figura 33 <i>Informe de resultados de laboratorio N.º LQ-11525C</i>	106
Figura 34 <i>Informe de resultados de laboratorio N.º LQ-11525C</i>	107
Figura 35 <i>Informe de resultados de laboratorio N.º LQ-11525D</i>	108
Figura 36 <i>Informe de resultados de laboratorio N.º LQ-11525D</i>	109

ÍNDICE DE ANEXOS

	Pág.
Anexo I. <i>Descripción de variables dependientes e independientes</i>	96
Anexo II. <i>Panel fotográfico, de la toma muestras</i>	97
Anexo III. <i>Aplicación de tratamientos y resultados</i>	98
Anexo IV. <i>Informes de laboratorio</i>	102

LISTA DE ABREVIATURAS

$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$:	Sulfato de aluminio
CaO:	Óxido de calcio
DBO:	Demanda bioquímica de oxígeno
DQO:	Demanda química de oxígeno
pH:	Potencial de hidrógeno
PTAR:	Planta de tratamiento de aguas residuales
SST:	Sólidos suspendidos totales
UTM:	Sistema de coordenadas Universal Transversal de Mercator
Vd:	Variable dependiente
Vi:	Variable independiente
VMA:	Valores máximos admisibles

RESUMEN

En la actualidad la generación de lactosueros provenientes de la producción quesera es una preocupación debido a su elevada carga de materia orgánica, sólidos suspendidos y turbidez, representando un riesgo para los cuerpos de agua y los ecosistemas cuando son vertidos sin tratamiento adecuado. Esta investigación evaluó la eficacia del óxido de calcio y el sulfato de aluminio en la reducción de la materia orgánica presente en los lactosueros generados en el distrito de Llallí, provincia de Melgar. La investigación fue de tipo aplicada, con enfoque cuantitativo y diseño experimental, evaluándose diferentes dosis de sulfato de aluminio (50, 80 y 100 mg/L) en combinación con óxido de calcio (2.0 g) mediante pruebas de coagulación y floculación. La metodología comprendió la recolección de muestras, aplicación de tratamientos mediante prueba de jarras y el análisis de parámetros fisicoquímicos: sólidos suspendidos totales (SST), turbidez, demanda química de oxígeno (DQO), demanda bioquímica de oxígeno (DBO), pH y temperatura. Asimismo, se realizaron tres repeticiones por tratamiento y análisis estadístico para determinar la dosis óptima. Los resultados evidenciaron que la dosis de 80 mg/L de sulfato de aluminio, en combinación con óxido de calcio fue la más eficiente, alcanzando remociones de 93.5% en SST, 87.1% en turbidez, 81.4% en DQO y 84.7% en DBO. Además, el tratamiento permitió mejorar el pH de los lactosueros, favoreciendo el proceso de coagulación-floculación. El uso combinado de óxido de calcio y sulfato de aluminio demostró ser una alternativa eficaz para reducir la carga contaminante de los lactosueros y contribuir a la disminución del impacto ambiental generado por estos efluentes.

Palabras clave: Coagulación, floculación, lactosueros, materia orgánica, óxido de calcio, sulfato de aluminio.

ABSTRACT

Currently, whey generation from cheese production is a concern due to its high organic matter, suspended solids, and turbidity content, posing a risk to water bodies and ecosystems when discharged without proper treatment. This research evaluated the effectiveness of calcium oxide and aluminum sulfate in reducing the organic matter present in whey generated in the district of Llalí, Melgar province. The research was applied, with a quantitative approach and experimental design, evaluating different doses of aluminum sulfate (50, 80, and 100 mg/L) in combination with calcium oxide (2.0 g) through coagulation and flocculation tests. The methodology included sample collection, application of treatments using jar tests, and analysis of physicochemical parameters: total suspended solids (TSS), turbidity, chemical oxygen demand (COD), biochemical oxygen demand (BOD), pH, and temperature. Furthermore, three replicates per treatment were performed, and statistical analysis was conducted to determine the optimal dose. The results showed that the 80 mg/L dose of aluminum sulfate, in combination with calcium oxide, was the most efficient, achieving removals of 93.5% for TSS, 87.1% for turbidity, 81.4% for COD, and 84.7% for BOD. In addition, the treatment improved the pH of the whey, promoting the coagulation-flocculation process. The combined use of calcium oxide and aluminum sulfate proved to be an effective alternative for reducing the pollutant load of whey and contributing to a decrease in the environmental impact generated by these effluents.

Keywords: Coagulation, flocculation, whey, organic matter, calcium oxide, aluminum sulfate.

INTRODUCCIÓN

La industria láctea constituye uno de los sectores productivos más relevantes a nivel mundial, especialmente en áreas rurales donde contribuye a la economía local. En el proceso de producción de productos lácteos, particularmente el queso, se generan importantes cantidades de lactosueros, un subproducto líquido que, debido a su alta carga orgánica y concentración de nutrientes, puede convertirse en un grave problema ambiental si no se maneja adecuadamente (Condori, 2025). La descarga de lactosuero sin tratamiento previo en cuerpos de agua provoca eutrofización, disminución de oxígeno y un deterioro de la calidad del agua, afectando tanto a los ecosistemas acuáticos como a las comunidades cercanas (Mulyadi et al., 2020).

El tratamiento de lactosuero ha sido un tema de creciente interés debido a la necesidad de disminuir su impacto ambiental y aprovechar sus componentes de manera sostenible. Diversos métodos de tratamiento físico-químico, como el uso de coagulantes y floculantes, han demostrado ser efectivos para la reducción de materia orgánica y la mejora de la calidad del agua (Tahraoui et al., 2024). En este contexto, el CaO y el $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ son dos de los coagulantes más utilizados debido a su capacidad para reducir SST, turbidez, DQO y DBO en el agua (Alsubih et al., 2022).

Esta investigación evaluó la eficacia del CaO y el $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ en la reducción de la materia orgánica presente en los lactosueros generados en el distrito de Llalli, Melgar, ubicado en la región de Puno, Perú. Donde, se buscó determinar las dosis óptimas de estos coagulantes para lograr una reducción eficiente de contaminantes y contribuir a la gestión adecuada de los residuos generados por la industria láctea, mejorando así la calidad del agua en la región. Se centró en el análisis de la concentración inicial de materia orgánica, turbidez y sólidos suspendidos totales en los lactosueros, así como en la evaluación de la eficacia de las diferentes dosis de óxido de calcio y sulfato de aluminio mediante el proceso de coagulación -floculación. Los resultados obtenidos permitieron

identificar la dosis más eficiente y aportaron recomendaciones para su implementación en las industrias lácteas de la región, contribuyendo a la sostenibilidad ambiental y a la mejora de la calidad del agua.

Este estudio aporta evidencia científica relacionada con el tratamiento de aguas residuales de origen lácteo, con implicaciones para la gestión ambiental y el desarrollo de prácticas industriales más sostenibles tanto en el Perú y en otras regiones con características similares.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Formulación del problema

A nivel internacional, el tratamiento de aguas residuales provenientes de la industria láctea, como los lactosueros que constituye una problemática ambiental y sanitaria de alcance mundial (Al-Tayawi et al., 2023). La producción de queso origina importantes cantidades de este subproducto, el cual, al ser vertido sin tratamiento, genera efectos adversos como la eutrofización, la disminución del oxígeno disuelto y la alteración de los ecosistemas acuáticos (Gamarra, 2018). Asimismo, los lactosueros contienen altas concentraciones de nutrientes como nitrógeno y fósforo, que contribuyen a la contaminación de los recursos hídricos. A pesar de que estos residuos pueden ser aprovechados en la producción de proteínas o como fertilizantes, su uso sigue siendo limitado (Flores, 2023). En este contexto, diversos países aún enfrentan dificultades para implementar tecnologías eficientes y sostenibles para su tratamiento, lo que pone de manifiesto la necesidad de implementar alternativas de tratamiento eficientes (Sonawane & Murthy, 2023).

En el Perú, la industria láctea desempeña un papel relevante en la economía rural; sin embargo, la gestión de los lactosueros presenta limitaciones en su manejo (LMI, 2018). La falta de infraestructura para su tratamiento, especialmente en zonas rurales, ocasiona que estos efluentes sean vertidos directamente en cuerpos de agua, generando contaminación y afectando la salud de las poblaciones cercanas (Quille et al., 2021). Además, estos subproductos no son aprovechados adecuadamente, lo que implica el desaprovechamiento de recursos con potencial valor económico. Aunque existen normativas ambientales para regular

los vertimientos, su aplicación es limitada en diversas regiones, sumado a la escasa capacitación de los productores en el manejo adecuado de estos residuos (Toapanta, 2019). En el distrito de Llalli, provincia de Melgar (Puno), la alta producción de lactosueros asociada a la actividad ganadera y quesera ocasiona impactos ambientales asociados a su manejo inadecuado. El vertimiento de estos efluentes sin tratamiento afecta las fuentes de agua destinadas al consumo humano y riego agrícola, impactando la calidad de vida de la población (Flores, 2023). Esta situación se agrava por la falta de infraestructura y tecnologías adecuadas para su tratamiento, así como por la limitada implementación de políticas ambientales. En este contexto, el problema central se delimita en la elevada carga de materia orgánica de los lactosueros, los cuales son vertidos sin tratamiento. Ante la ausencia de estudios locales que evalúen la eficacia de coagulantes específicos como el CaO y el $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, surge la necesidad de investigar su aplicación para reducir la carga contaminante y mejorar la calidad de los efluentes generados.

1.1.1. Problema general

¿Cuál es la eficacia del óxido de calcio y del sulfato de aluminio en la reducción de materia orgánica presente en los lactosueros generados en el distrito de Llallí, Melgar?

1.1.2. Problemas específicos

- ¿Cuál es la concentración inicial de materia orgánica, turbidez y sólidos suspendidos totales en los lactosueros generados en el distrito de Llalli?
- ¿Cuál es la dosis óptima de óxido de calcio y sulfato de aluminio para la reducción de materia orgánica en los lactosueros generados en el distrito de Llalli?
- ¿En qué medida el óxido de calcio y el sulfato de aluminio son eficaces para la reducción de materia orgánica en los lactosueros generados en el distrito de Llalli?

1.2. Objetivos de la investigación

1.2.1. Objetivo general

Evaluar la eficacia del óxido de calcio y sulfato de aluminio en la reducción de materia orgánica presente en los lactosueros generados en el distrito de Llalli, Melgar.

1.2.2. Objetivos específicos

- Determinar la concentración inicial de la materia orgánica, turbidez y sólidos suspendidos totales en los lactosueros generados en el distrito de Llalli.
- Establecer la dosis óptima de óxido de calcio y sulfato de aluminio para la reducción de la materia orgánica en los lactosueros generados en el distrito de Llalli.
- Comparar la eficacia del óxido de calcio y el sulfato de aluminio en la reducción de materia orgánica presente en los lactosueros generados en el distrito de Llalli.

1.3. Hipótesis de la investigación

1.3.1. Hipótesis general

El uso combinado de óxido de calcio y sulfato de aluminio reduce la materia orgánica (DBO y DQO) presente en los lactosueros generados en el distrito de Llalli, Melgar, en función de la dosis aplicada.

1.3.2. Hipótesis específicas

- Los lactosueros generados en el distrito de Llalli presentan elevadas concentraciones de DBO, DQO, sólidos suspendidos totales y turbidez.
- La aplicación de diferentes dosis de sulfato de aluminio en combinación con óxido de calcio produce variaciones en la reducción de los parámetros fisicoquímicos (SST, turbidez, DQO y DBO) de los lactosueros, permitiendo determinar una dosis óptima.

- Existen diferencias en la eficiencia de reducción de la materia orgánica presente en los lactosueros cuando se aplican diferentes dosis de sulfato de aluminio en combinación con óxido de calcio.

1.4. Justificación de la investigación

1.4.1. Justificación ambiental

El aporte ambiental del presente estudio radica en la aplicación de CaO y $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ para el tratamiento de lactosueros, lo que permite reducir la carga de materia orgánica (DBO y DQO), así como los SST y la turbidez. Esta reducción contribuye a mejorar la calidad del agua y disminuir el impacto ambiental generado por el vertimiento de estos efluentes sin tratamiento, evitando la contaminación de los cuerpos de agua y la degradación de los ecosistemas acuáticos. Asimismo, el tratamiento favorece el acercamiento a los valores máximos admisibles establecidos en la normativa ambiental vigente, promoviendo una gestión más sostenible de los residuos de la industria láctea, especialmente en zonas rurales como el distrito de Llalli.

1.4.2. Justificación social

Los beneficiarios directos de esta investigación son los productores queseros artesanales del distrito de Llalli, quienes podrán aplicar alternativas de tratamiento para mejorar la gestión de los lactosueros generados y reducir el impacto ambiental de sus actividades. Asimismo, los beneficiarios indirectos incluyen a las comunidades rurales y pobladores de la zona, quienes se verán favorecidos por la mejora en la calidad de los recursos hídricos, contribuyendo a disminuir riesgos para la salud pública asociados a la contaminación del agua. De igual manera, el tratamiento de los lactosueros favorecerá la disponibilidad de agua de mejor calidad para el consumo y el riego

agrícola. Además, los resultados obtenidos podrán servir de base para que las autoridades locales y entidades ambientales implementen estrategias orientadas a la gestión y control de la contaminación generada por la industria láctea.

1.4.3. Justificación económica

La industria láctea en la región Puno constituye una importante fuente de ingresos para la población rural. En el distrito de Llalli, la actividad quesera representa una fuente económica relevante, donde asociaciones de productores producen cerca de 4000 quesos al mes (Choquehuanca, 2025). En este contexto, el tratamiento con CaO y $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ permite reducir la carga contaminante, disminuir costos asociados al manejo de efluentes y evitar posibles sanciones por incumplimiento de la normativa ambiental. Asimismo, favorece la reutilización del lactosuero en la producción de fertilizantes orgánicos, generando beneficios económicos para los productores queseros y promoviendo una industria más sostenible.

1.5. Variables

1.5.1. Descripción de variables analizadas

a. Variables dependientes

- Concentración de DBO y DQO (mg/L)
- Turbidez (NTU).
- Sólidos suspendidos totales (mg/L).

b. Variables independientes

- Tipo de coagulante
- Dosis de coagulante (mg/L)

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Antecedentes

2.1.1. Antecedentes internacionales

Al-Tayawi et al. (2023) analizaron distintas tecnológicas aplicadas para el tratamiento de efluentes lácteos, con el objetivo de examinar la eficacia de diferentes métodos de tratamientos. Los autores reportaron que los métodos convencionales de tratamiento presentan limitaciones para lograr una eliminación eficiente de los contaminantes. Por lo que recomendaron la incorporación de procesos complementarios como la coagulación y adsorción para mejorar la eficiencia del tratamiento.

Kaur (2021) analizó las diversas técnicas empleadas en el tratamiento de aguas residuales provenientes de la industria láctea. La metodología que aplicó fue de tipo descriptivo y de revisión de literatura, considerando información sobre el uso del agua en procesos de producción, limpieza y refrigeración en la industria láctea. Los resultados evidenciaron que estas actividades generan efluentes con alta carga orgánica, caracterizados por elevados valores de (DBO) y (DQO), los cuales, si no son tratados adecuadamente, pueden ocasionar contaminación en los cuerpos de agua y afectar los ecosistemas. En este sentido, señaló que es necesario implementar métodos de tratamiento eficientes para reducir el impacto ambiental de estos efluentes, lo cual respalda la importancia de aplicar tratamientos fisicoquímicos como los evaluados en la presente investigación.

Elabdouni et al. (2022) evaluaron la eliminación de materia orgánica y polifenoles mediante coagulación-floculación con $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ y cal en aguas residuales industriales,

con el fin de determinar la eficacia de estos coagulantes en la reducción de contaminantes. La metodología fue de tipo experimental, aplicando diferentes dosis de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ y cal en efluentes de la industria de aceite de oliva. Los resultados mostraron que con 1,7 g/L de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ se logró remover el 58% de la DQO y 23% de los SST, mientras que con 20 g/L de cal se alcanzó una reducción del 52% de la DQO y 48% de los SST. Asimismo, la combinación de ambos coagulantes permitió mejorar la eficiencia, alcanzando reducciones del 64% de la DQO y 72% de los SST. Estos resultados evidencian que la combinación de coagulantes mejora el tratamiento, lo que respalda el uso de CaO y $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ en la presente investigación.

Mulyadi et al. (2020) investigaron la eficacia del CaO y el $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ en la eliminación de hierro, manganeso y color en aguas de turba, con el propósito de determinar la eficiencia de estos coagulantes en la mejora de la calidad del agua. Mediante procesos de tratamiento en sistemas por lotes y en flujo continuo sobre muestras de agua de turba. Los resultados evidenciaron que, en el método por lotes, el hierro se redujo de 3,5 ppm a 0,1 ppm (97%), el manganeso a 0 ppm (100%), el color de 130 TCU a 1,7 TCU y la turbidez de 33,8 NTU a 1,9 NTU, con un incremento del pH de 3,19 a 6,8. Por otro lado, en el método continuo, el hierro disminuyó de 3,35 ppm a 0,05 ppm (98,6%), el manganeso también se redujo a 0 ppm y la turbidez de 31,8 NTU a 1,14 NTU, alcanzando un pH de 7,16. Ambos tratamientos cumplieron con los estándares de calidad del agua. Estos resultados evidencian la alta eficiencia del CaO y el $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ en la reducción de contaminantes, lo que respalda su aplicación en el tratamiento de lactosueros en la presente investigación.

Bairagi & Rastogi (2015) señalan que el tratamiento fisicoquímico de aguas residuales de la industria láctea con alumbre, cal, cloruro férrico y sulfato ferroso mostró una reducción de contaminantes. Con 75 mg/l de alumbre, se eliminó el 30% de DQO, 20% de DBO, 62% de SST y 45,78% de aceites y grasas. Usando 50 mg/l de alumbre y 10 mg/l de cal, las reducciones fueron 37,5% en DBO y 72,2% en SST. Con 300 mg/l de sulfato ferroso, se eliminó el 55% de DBO y 88% de SS. El sulfato ferroso fue el más efectivo en la eliminación de contaminantes. Donde confirman la eficacia del tratamiento fisicoquímico en las aguas residuales lácteas.

Tahraoui et al. (2024) evaluaron la efectividad del tratamiento de coagulación-floculación con $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$. Donde tomaron muestras diarias durante un mes, caracterizándolas por diversos parámetros fisicoquímicos como pH, turbidez, materia orgánica y metales. Las muestras fueron tratadas con $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ utilizando el método de prueba de frascos para determinar la dosis óptima de coagulante. Y mostraron una eliminación efectiva de contaminantes, con una reducción de los parámetros fisicoquímicos, demostrando la efectividad del tratamiento.

Vielman (2019) determinó del pH óptimo de coagulación, empleando $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ y sulfato ferroso en el tratamiento de aguas residuales de una industria alimentaria, con la finalidad de evaluar la eficiencia de estos coagulantes bajo diferentes condiciones de pH. La metodología empleada fue de tipo experimental, utilizaron la prueba de jarras en muestras de aguas residuales provenientes de una industria de harina de trigo, para evaluar los procesos de coagulación, floculación y sedimentación. Resultando que el pH óptimo de coagulación con $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ fue de 6.6, logrando una turbidez de 25,6 NTU y una concentración de sólidos suspendidos de 28 mg/L, cumpliendo con el

acuerdo gubernativo 236-2006 por otro lado, el uso de sulfato ferroso no presentó mejoras en los parámetros evaluados. Esto resalta la importancia del control del pH en la eficiencia del proceso de coagulación, lo cual sustenta su consideración en la presente investigación.

2.1.2. Antecedentes nacionales

Gamarra (2018) analizó los impactos ambientales por el lactosuero generado en la línea de producción de quesos, con el objetivo de proponer alternativas de mitigación orientadas a disminuir la contaminación derivada de ese efluente. La metodología fue de tipo descriptivo, analizó el consumo de recursos y la generación de residuos. Donde se evidenciaron una alta carga orgánica en las aguas residuales y problemas asociados a la falta de tecnologías adecuadas y una deficiente gestión. Asimismo, propusieron tecnologías limpias para reducir la contaminación y aprovechar el lactosuero. Estos hallazgos resaltan la necesidad de implementar tratamientos adecuados, lo que respalda la presente investigación.

Guzmán (2023) optimizó el $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ en el tratamiento de aguas residuales domésticas, evaluando su efecto sobre la reducción de la DQO y DBO para mejorar la calidad del efluente tratado. La metodología fue de tipo experimental, empleó la prueba de jarras con diferentes concentraciones y dosis del coagulante. Donde se evidenció concentraciones iniciales elevadas de contaminación orgánica (392.74 mg/L de DQO y 210.8 mg/L de DBO), superando los límites establecidos por el D.S. N° 003-2010-MINAM. La dosis óptima fue de 1% y 50 mL, logrando un pH de 6.5 y eficiencias de reducción del 85.7% en DQO y 87.9% en DBO, cumpliendo con la

normativa. Estos resultados evidencian la eficacia del $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ en la reducción de materia orgánica, lo cual respalda su aplicación en la presente investigación.

Chavez & Gomez (2022) analizaron el tratamiento de aguas residuales provenientes de una industria láctea, con el objetivo de determinar un tratamiento adecuado para mejorar la calidad del vertimiento. La metodología fue experimental con una muestra de 10 litros de aguas residuales. Donde lograron una reducción de la DBO de 170 mg/L a 90.20 mg/L y de los SST de 132.0 mg/L a 85.1 mg/L, cumpliendo con los estándares locales. Esto demuestra la eficacia del tratamiento en la reducción de contaminantes.

Huaman, (2024) evaluó la reducción de contaminantes fisicoquímicos presentes en aguas residuales domésticas mediante coagulación-floculación y adsorción, con enfoque experimental. Con $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ (1.5 g). Donde se removió 58.56% de DQO, 59.66% de DBO_5 y 76.26% de SST; y mediante adsorción (pH 5, 2 g) se logró 84.01%, 85.59% y 97.84%, respectivamente. El tratamiento final redujo los valores a 80.2 mg/L de DQO, 39.8 mg/L de DBO_5 y 87.9 mL/L de SST, cumpliendo la normativa.

2.1.3. Antecedentes regionales

Quille et al. (2021) desarrollaron una investigación sobre potencialidades del lactosuero generado por la industria quesera y su valorización, con el fin de analizar el impacto ambiental del vertido de lactosuero y su aprovechamiento. La metodología fue de tipo descriptivo. El cual resultó que el vertido de lactosuero genera contaminación ambiental y que su adecuada gestión permite reducir estos impactos. Estos hallazgos resaltan la importancia de gestionar adecuadamente el lactosuero, lo que respalda la presente investigación.

Godoy (2019) evaluó el impacto ambiental generado por la producción de queso fresco en Ayaviri. La metodología fue de enfoque cuantitativo, analizando la relación entre el lactosuero generado y el impacto ambiental. Donde se evidenció que el vertido de lactosuero afecta negativamente el medio ambiente, debido a su alta carga de SST, DBO, grasas y aceites, provenientes principalmente de pérdidas de materias primas y aguas de lavado. Esto resalta la necesidad de implementar tratamientos adecuados, lo cual respalda la presente investigación.

2.2. Marco teórico

2.2.1. Industria quesera

La industria quesera es el sector industrial dedicado a la transformación de la leche en diversos productos derivados, siendo el queso uno de los más representativos (Lama, 2022). Esta industria abarca una serie de procesos técnicos y tecnológicos enfocados en la coagulación de la leche para separar los sólidos (cuajada) del líquido (suero), resultando en la producción de diferentes tipos de quesos según su textura, sabor, contenido graso y tipo de leche utilizada (vaca, cabra, oveja, etc.) (Afolalu et al., 2022).

a. Proceso clave en la industria quesera

Los procesos principales en la fabricación de queso incluyen (Guijarro, 2024).

- **Recepción y pasteurización de la leche:** La leche cruda es sometida a un proceso de pasteurización para eliminar microorganismos patógenos y mejorar la seguridad alimentaria.
- **Coagulación:** Se añade un agente coagulante (como el cuajo) para separar la leche en cuajada (sólidos) y suero (líquido).

- **Corte de la cuajada:** La cuajada se corta para facilitar el drenaje del suero.
- **Desuerado y prensado:** El suero se elimina y la cuajada se prensa para darle forma y eliminar más líquido.
- **Salado y maduración:** El queso se sala para darle sabor y mejorar su conservación. Dependiendo del tipo de queso, este proceso puede incluir un período de maduración.

2.2.2. Lactosuero

Lactosuero es el líquido que se obtiene como subproducto durante el proceso de fabricación de productos lácteos, especialmente queso. Se produce cuando la leche se coagula para separar la cuajada (el sólido) del suero (el líquido), un proceso clave en la elaboración de quesos. Este subproducto contiene una mezcla compleja de compuestos, incluidos agua, proteínas, azúcares (principalmente lactosa), minerales y una pequeña cantidad de grasas (Cedillo & Flores, 2023).

a. Tipos de lactosuero

El lactosuero puede variar en su composición dependiendo del tipo de queso que se produzca, ya que diferentes tipos de queso implican procesos de coagulación, separación y desuerado variados (Gupta et al., 2019). Algunos tipos de lactosueros incluyen:

- **Lactosuero dulce:** El obtenido a partir de la coagulación de la leche con cuajo, usado en la fabricación de quesos como el queso cheddar, mozzarella y otros quesos duros.
- **Lactosuero ácido:** El resultado de la coagulación de la leche por ácido láctico, utilizado en la producción de quesos frescos o de pasta blanda.

2.2.3. Composición del lactosuero

La composición de los lactosueros está dada por cantidad de lactosa, proteínas, grasas, y minerales (Tuset, 2020). Describas a continuación:

a. Lactosa

Es el azúcar principal en la leche, y una parte de ella permanece en el lactosuero después de la coagulación. La lactosa es altamente soluble en agua y contribuye a la carga orgánica de las aguas residuales.

b. Proteínas

La principal fuente de materia orgánica en las aguas residuales de la industria quesera es la caseína, una proteína presente en la leche. Durante el proceso de coagulación, una gran parte de la proteína se separa en la cuajada, pero una fracción pequeña queda en el suero.

c. Grasas

Dependiendo del tipo de queso, las grasas lácteas o aceites pueden ser liberados en el agua residual durante el proceso de desuerado, especialmente si se fabrican quesos cremosos o grasos. Estas grasas son difíciles de eliminar mediante técnicas tradicionales de tratamiento de aguas.

d. Minerales

Incluyen calcio, magnesio, fósforo, y otros minerales solubles que están presentes tanto en el suero como en el queso, y que pueden influir en la calidad del agua.

2.2.4. Características fisicoquímicas del lactosuero

a. Potencial de hidrógeno (pH)

El pH es una medida de la acidez o alcalinidad del agua, que se mide en una escala que va de 0 a 14, siendo 7 el valor neutro. Un pH por debajo de 7 indica acidez, mientras que un pH por encima de 7 indica alcalinidad (Osorio-Rivera et al., 2021).

- Importancia: El pH es crucial para el funcionamiento de los procesos biológicos de tratamiento, ya que muchos microorganismos responsables de la biodegradación de la materia orgánica requieren condiciones específicas de pH para sobrevivir y ser eficaces (Bejarano-Toro et al., 2022).

b. Demanda bioquímica de oxígeno

La Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) es un parámetro que mide la cantidad de oxígeno necesario para que los microorganismos aeróbicos descompongan la materia orgánica biodegradable presente en el agua. Se expresa en miligramos de oxígeno consumido por litro de agua (mg/L) durante un período de 5 días a 20°C, en condiciones estándar (Al-Tayawi et al., 2023).

- Importancia: La DBO es un indicador clave de la cantidad de materia orgánica biodegradable en el agua. Una alta DBO indica que hay una gran cantidad de materia orgánica que puede consumir oxígeno, lo que podría afectar la salud de los ecosistemas acuáticos al reducir el oxígeno disuelto en el agua.

c. Demanda química de oxígeno

La Demanda Química de Oxígeno (DQO) es un parámetro que mide la cantidad total de oxígeno necesario para oxidar tanto la materia orgánica biodegradable como la no biodegradable en el agua. Se utiliza un reactivo químico fuerte para determinar

esta cantidad de oxígeno y es un buen indicador de la contaminación total del agua (Hernández, 2025).

- **Importancia:** A diferencia de la DBO, que solo mide la materia orgánica biodegradable, la DQO evalúa la cantidad total de contaminantes orgánicos presentes, incluyendo aquellos que no pueden ser fácilmente descompuestos por microorganismos.

d. Sólidos suspendidos totales

Los Sólidos Suspendidos Totales (SST) son partículas sólidas que permanecen suspendidas en el agua, que incluyen tanto material orgánico como inorgánico. Se miden en miligramos por litro (mg/L) y se obtienen al filtrar el agua a través de un filtro de 0.45 micras y secar el material recolectado (Betancur & Molina, 2019).

- **Importancia:** Los SST afectan la claridad del agua y pueden interferir con los procesos de tratamiento y la filtración. Además, los sólidos suspendidos pueden ser una fuente de nutrientes y materiales para los microorganismos en el agua, contribuyendo a la contaminación orgánica.

e. Turbidez

La turbidez es un parámetro físico que mide la pérdida de transparencia de un líquido debido a la presencia de partículas suspendidas, tales como proteínas, grasas, microorganismos y otros compuestos orgánicos e inorgánicos (Lama, 2022). Estas partículas dispersan la luz al atravesar la muestra, generando una apariencia turbia del agua.

- **Importancia:** En los lactosueros, valores elevados de turbidez están asociados a la presencia de proteínas, grasas y partículas de cuajada, por lo que este

parámetro permite evaluar la eficiencia de los procesos de coagulación-floculación y la reducción de contaminantes.

Tabla 1

Valores típicos de los parámetros fisicoquímicos del lactosuero

Parámetro	Unidad	Valor típico
pH	-	6 - 9
DBO	mg/L	150 - 300
DQO	mg/L	300 - 500
SST	mg/L	100 - 300
Turbidez	NTU	>1000*

Fuente: Adaptado de Hernández (2025).

2.2.5. Impacto ambiental del lactosuero

El vertido de aguas residuales de la industria quesera sin tratar o con un tratamiento inadecuado puede tener efectos negativos en el medio ambiente (Godoy, 2019), los cuales se describen a continuación:

a. Eutrofización

El exceso de nutrientes como el nitrógeno y fósforo favorece el crecimiento excesivo de algas en cuerpos de agua, lo que reduce el oxígeno disuelto y daña la biodiversidad acuática. Este proceso es conocido como eutrofización, que puede resultar en la muerte de peces y la alteración del ecosistema acuático.

b. Contaminación del agua

La alta carga orgánica en las aguas residuales de la industria quesera (DBO) puede reducir los niveles de oxígeno en cuerpos de agua cercanos, afectando tanto la calidad del agua como los organismos acuáticos. La presencia de materia orgánica biodegradable y grasa contribuye a esta contaminación.

c. Contaminación del suelo

Si las aguas residuales se vierten sobre el suelo sin tratamiento, los contaminantes pueden filtrarse al subsuelo y contaminar los recursos hídricos subterráneos.

d. Riesgo para la salud pública

Los microorganismos patógenos presentes en las aguas residuales pueden representar un riesgo significativo para la salud humana y animal, especialmente si el agua contaminada llega a fuentes de agua potable.

2.2.6. Tratamiento de lactosueros

El tratamiento de las aguas residuales de la industria quesera es crucial para minimizar su impacto ambiental, las aguas residuales de la industria quesera presentan una alta carga orgánica, principalmente en forma de proteínas y lactosa, y un contenido significativo de grasa y aceites (Balladares, 2016). Un tratamiento adecuado de estas aguas es esencial para evitar efectos negativos sobre el medio ambiente, como la eutrofización y la contaminación microbiológica. El uso de coagulantes, como CaO y $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, ha demostrado ser efectivo para reducir los contaminantes y mejorar la calidad del agua tratada (Betancur & Molina, 2019).

a. Coagulación

La coagulación es un proceso físico-químico utilizado en el tratamiento de aguas residuales y otros líquidos, cuyo objetivo es la eliminación de partículas suspendidas y materia orgánica en el agua. Este proceso implica la adición de coagulantes, sustancias químicas que neutralizan las cargas de las partículas en suspensión, provocando su aglutinación en flóculos más grandes que luego pueden ser eliminados mediante sedimentación, filtración o flotación (Badawi et al., 2023).

- **Tipos de coagulantes**

Existen varios tipos de coagulantes utilizados en el tratamiento de aguas, entre los cuales los más comunes son el CaO y $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ (Quintero-Yepes & Rodríguez-Valencia, 2020), de igual forma se describen sus ventajas y aplicaciones:

- ✓ **Óxido de calcio (CaO):** Es un coagulante alcalino que se utiliza para alterar el pH del agua y facilitar la eliminación de partículas suspendidas y materia orgánica. Al disolverse en agua, forma hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), que favorece la coagulación y mejora la sedimentación.
- ✓ **Sulfato de aluminio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$):** Es un coagulante ácido ampliamente utilizado en el tratamiento de aguas residuales debido a su efectividad en la eliminación de sólidos suspendidos y la mejora de la turbidez. Al reaccionar con los contaminantes, forma flóculos que luego son eliminados por sedimentación.

- **Aplicación de la coagulación**

La coagulación se utiliza en diversos procesos de tratamiento de aguas, tales como:

- ✓ **Tratamiento de aguas residuales:** Para la eliminación de sólidos suspendidos y materia orgánica en efluentes industriales y domésticos.
- ✓ **Purificación de agua potable:** En plantas de tratamiento de agua para mejorar la calidad del agua antes de su distribución.

- ✓ **Tratamiento de lactosueros:** En la industria láctea, la coagulación es crucial para eliminar las partículas de cuajada, grasa y otros contaminantes del lactosuero, mejorando la calidad del agua residual.
- **Ventajas de la coagulación**
 - ✓ Eficiencia en la eliminación de partículas finas y materia orgánica.
 - ✓ Fácil de controlar y ajustar según las características del agua a tratar.
- **Factores que influyen**
 - ✓ **El pH:** Influye directamente en la acción de los coagulantes y en la formación de flóculos. Cada coagulante presenta un rango óptimo de pH para maximizar la reducción de contaminantes.
 - ✓ **Dosis del coagulante:** La cantidad de coagulante aplicada debe ser adecuada para neutralizar las cargas de las partículas suspendidas. Una dosis insuficiente reduce la eficiencia del proceso, mientras que una dosis excesiva puede generar reestabilización de las partículas.
 - ✓ **Tiempo y velocidad de mezcla rápida:** Una adecuada agitación inicial favorece la dispersión uniforme del coagulante y el contacto con las partículas presentes en el agua residual.
 - ✓ **Características del efluente:** La concentración de materia orgánica, sólidos suspendidos, turbidez y otras sustancias presentes en el agua influyen en la eficiencia de la coagulación.
 - ✓ **Temperatura:** Las variaciones de temperatura pueden afectar la velocidad de las reacciones químicas y la formación de flóculos.

b. Floculación

La floculación es un proceso físico-químico utilizado en el tratamiento de aguas residuales y otros líquidos, que sigue a la coagulación y tiene como objetivo la agregación de partículas suspendidas más pequeñas en flóculos más grandes y fácilmente eliminables. Estos flóculos son masas formadas por la unión de partículas coaguladas, y su formación facilita su sedimentación o eliminación por filtración (Badawi et al., 2023).

- **Mecanismo de acción de la floculación**

La floculación ocurre después de la coagulación, un proceso en el que se añaden coagulantes (como el $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ o el CaO) para neutralizar las cargas de las partículas suspendidas, permitiendo su aglutinación. En la floculación, el proceso implica:

- ✓ **Formación de Flóculos:** Una vez que las partículas han sido coaguladas, se agregan sustancias floculantes (generalmente polímeros) que promueven la agregación de estas partículas en flóculos más grandes.
- ✓ **Aumento de la Tamaño de las Partículas:** Los flóculos formados son más grandes, lo que les permite sedimentarse más rápidamente y ser eliminados del agua mediante procesos como la sedimentación o filtración
- ✓ **Eliminación de Flóculos:** Los flóculos, al ser más pesados, pueden ser retirados eficazmente mediante técnicas de sedimentación o filtración, mejorando la calidad del agua.

- **Factores que influyen**

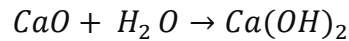
- ✓ **Tiempo de floculación:** Un tiempo adecuado permite que las partículas coaguladas entren en contacto y formen flóculos de mayor tamaño.
- ✓ **Velocidad de agitación lenta:** Una agitación suave favorece el crecimiento de los flóculos; velocidades excesivas pueden romperlos y disminuir la eficiencia del proceso.
- ✓ **Tamaño y densidad de los flóculos:** Flóculos más grandes y compactos sedimentan con mayor facilidad, mejorando la reducción de contaminantes.
- ✓ **Concentración de partículas suspendidas:** La cantidad de partículas presentes influye en la frecuencia de colisiones necesarias para la formación de flóculos.
- ✓ **pH del medio:** El pH también afecta la estabilidad y formación de los flóculos, especialmente cuando se emplean coagulantes como el $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ y el CaO .
- ✓ **Temperatura:** Temperaturas bajas pueden disminuir la velocidad de agregación de las partículas y afectar la formación de flóculos.

2.2.7. Óxido de Calcio

El óxido de calcio (CaO), conocido también como cal viva, es un coagulante alcalino utilizado para elevar el pH del agua y promover la coagulación de partículas en suspensión (Osorio-Rivera et al., 2021). Cuando el CaO entra en contacto con el agua residual, reacciona de la siguiente manera:

a. Reacción de Hidratación del Óxido de Calcio:

El óxido de calcio reacciona con el agua, formando hidróxido de calcio (Ca(OH)_2), un compuesto que aumenta la alcalinidad del agua y facilita la coagulación.



b. Coagulación:

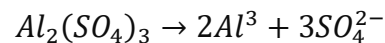
El hidróxido de calcio (Ca(OH)_2), al elevar el pH, favorece la precipitación de sólidos suspendidos y materia orgánica en el agua. Este proceso ayuda a la formación de flóculos, que luego se pueden eliminar por sedimentación. El aumento de pH favorece la formación de flóculos de hidróxidos metálicos (como hidróxido de aluminio, si se utiliza el $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ en combinación), que atraen las partículas cargadas y las agrupan para su posterior eliminación.

2.2.8. Sulfato de aluminio

El sulfato de aluminio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) es un coagulante comúnmente utilizado para tratar aguas residuales, incluida la del lactosuero (Chavez & Gomez, 2022). Este coagulante es eficaz en la eliminación de partículas finas y materia orgánica, y su mecanismo de acción involucra varias reacciones químicas:

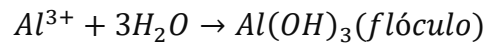
a. Disolución del sulfato de aluminio

El $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ se disuelve en agua, liberando iones de aluminio (Al^{3+}), que son los responsables de la coagulación.



b. Formación de flóculos

Los iones de aluminio (Al^{3+}) reaccionan con las partículas en suspensión y la materia orgánica en el agua, formando flóculos de hidróxido de aluminio ($Al(OH)_3$), que son fácilmente eliminables por sedimentación o filtración.



c. Reducción de materia orgánica

El hidróxido de aluminio formado, al actuar como un aglutinante, permite la eliminación de partículas pequeñas y materia orgánica presente en los lactosueros.

Esto ayuda a reducir la (DBO) y (DQO) del efluente tratado.

2.2.9. Prueba de jarras

La prueba de jarras es un procedimiento utilizado en el tratamiento de aguas para determinar la dosis óptima de coagulantes y floculantes, y evaluar la eficacia del proceso de coagulación-floculación en la eliminación de sólidos suspendidos, materia orgánica y turbidez. Este método se realiza en un laboratorio utilizando varios frascos o jarras donde se añaden diferentes dosis de coagulante a muestras de agua o efluentes, simulando las condiciones de tratamiento a pequeña escala (Cedillo & Flores, 2023).

a. Preparación de la muestra

Se selecciona una muestra representativa del agua o del efluente a tratar (en este caso, lactosueros o aguas residuales industriales). Se puede utilizar entre 1 a 2 litros de muestra, dependiendo de la cantidad de pruebas que se deseen realizar.

b. Distribución de jarras

La muestra se divide en varias jarras o frascos, que son recipientes de vidrio o plástico, donde se llevará a cabo el tratamiento. Cada jarra será utilizada para probar diferentes dosis de coagulante.

c. Adición de coagulante

Se agregan coagulantes (como $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, CaO , o cloruro férrico) a cada jarra, con distintas concentraciones para evaluar cuál es la dosis más eficaz. Las dosis de coagulante se seleccionan dentro de un rango previamente estimado para poder determinar la cantidad óptima.

d. Agitación rápida (coagulación)

Cada jarra es agitada a alta velocidad (aproximadamente 100-200 rpm) durante 1-2 minutos. Este paso simula el proceso de coagulación, donde las partículas suspendidas y las impurezas presentes en el agua reaccionan con el coagulante, neutralizando sus cargas y permitiendo que se aglutinen.

e. Agitación lenta (floculación)

Posteriormente, se reduce la velocidad de agitación a 20-40 rpm durante un tiempo de 15-30 minutos. Este paso simula el proceso de floculación, donde los flóculos formados por la coagulación se unen para formar flóculos más grandes y pesados, que pueden ser eliminados más fácilmente en las siguientes etapas del tratamiento.

f. Sedimentación

Después de la agitación lenta, se permite que los flóculos se sedimenten en el fondo de las jarras. Este proceso simula la sedimentación natural en un proceso de tratamiento real, donde los flóculos se depositan en el fondo y el agua clarificada queda en la parte superior.

g. Evaluación de los resultados

Después de la sedimentación, se observa visualmente la calidad del agua en la parte superior de las jarras. El objetivo es determinar la turbidez y la claridad del agua después del tratamiento.

h. Determinación de la dosis óptima

Los resultados obtenidos en cada jarra permiten determinar la dosis óptima de coagulante que proporciona la mayor reducción de contaminantes (baja turbidez, bajos niveles de DBO y DQO, eliminación de sólidos suspendidos). Esto se selecciona basándose en la mejor calidad del agua alcanzada en el proceso de coagulación-floculación.

i. Repetición del proceso (si es necesario)

Si es necesario, el proceso puede repetirse con diferentes dosis de coagulantes o con cambios en las condiciones de agitación y tiempo de contacto para evaluar su impacto en la eficiencia del tratamiento

CAPÍTULO III

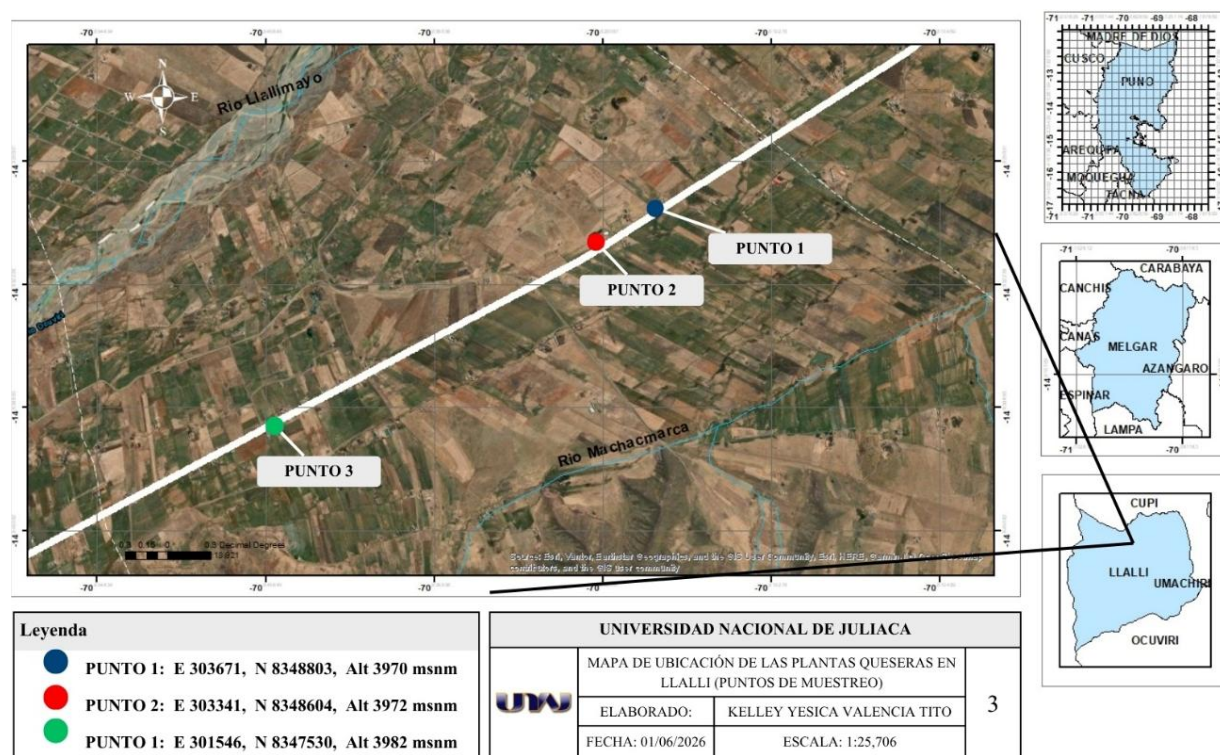
MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Ámbito de estudio

Este estudio se realizó en el distrito de Llalli, en la provincia de Melgar, Puno, Perú. Situada a 3900 m.s.n.m. Es una región agrícola y ganadera destacada por la producción de productos lácteos.

Figura 1

Mapa de ubicación de las plantas queseras en Llalli (Puntos de muestreo)



Fuente: Elaboración propia (2025).

Tabla 2*Ubicación de los puntos de monitoreo de lactosuero en el distrito de Llalli*

N°	Código	Ubicación	Coordenadas (UTM)
1	P – 01	Llalli/Melgar/Puno	E: 300056 N: 8346700
2	P – 02	Llalli/Melgar/Puno	E: 303671 N: 8348803
3	P – 03	Llalli/Melgar/Puno	E: 301546 N: 8347530

Fuente: Elaboración propia (2025).

3.2.Tipo, nivel, enfoque y diseño de investigación

3.2.1. Tipo de investigación

El tipo de investigación es aplicada, ya que se centró en la resolución de un problema específico relacionado con el tratamiento de lactosueros generados en la industria quesera de Llalli, Melgar, Puno. El objetivo fue evaluar la eficacia de coagulantes (CaO y $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) para reducir la materia orgánica y mejorar la calidad del agua residual. Este estudio buscó aplicar conocimientos existentes sobre tratamiento de aguas a un caso práctico de la industria láctea local, contribuyendo con soluciones concretas para mejorar el proceso de tratamiento de aguas residuales.

3.2.2. Nivel de investigación

El nivel de la investigación es explicativo, debido a que se determinaron y explicaron los efectos que las dosis de los coagulantes (CaO y $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) ejercieron sobre los parámetros fisicoquímicos evaluados en los lactosueros generados en el distrito de Llalli, Melgar.

3.2.3. Enfoque de investigación

El enfoque de esta investigación fue cuantitativo, ya que se obtuvieron datos numéricos para evaluar la eficacia de los coagulantes en el tratamiento de lactosueros. Se midieron

parámetros como la (DBO), (DQO), turbidez y (SST). Posteriormente, los datos obtenidos fueron analizados estadísticamente para determinar el efecto de las dosis aplicadas sobre la calidad del efluente tratado.

3.2.4. Diseño de la investigación

La investigación presento un diseño experimental, debido a que se evaluó el efecto de diferentes dosis de CaO y $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ sobre la reducción de materia orgánica en los lactosueros generados en el distrito de Llalli, Melgar (Puno). Este diseño permitió establecer una relación causa-efecto entre la aplicación de dosis de coagulantes y los cambios en los parámetros de calidad del agua, tales como turbidez, demanda bioquímica de oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO) y sólidos suspendidos totales (SST).

3.3. Técnicas e instrumentos

3.3.1. Técnicas

Observación directa, análisis en laboratorio, comparación de resultados y análisis estadístico

3.3.2. Instrumentos

a. Físicos

Multiparámetro, balanza analítica y termómetro

b. Documentales

Cadena de custodia y protocolos de muestreo

3.4. Población y muestra

3.4.1. Población

La población de estudio está constituida por los lactosueros generados como subproducto de la actividad quesera artesanal en el distrito de Llalli, provincia de Melgar, departamento de Puno. Desde el punto de vista conceptual, la población comprende todos los efluentes líquidos derivados del procesamiento de leche en la producción de queso, caracterizados por su alta carga de materia orgánica. En el aspecto espacial, la investigación se delimitó al distrito de Llalli, donde se identifican unidades productivas representativas de la actividad láctea. En cuanto a la delimitación temporal, el estudio se desarrolló durante el periodo de ejecución de la investigación, desde setiembre a noviembre del año 2025, considerando muestras recolectadas en dicho intervalo de tiempo.

3.4.2. Muestra

La muestra estuvo conformada por lactosueros recolectados de tres puntos de muestreo (P-01, P-02 y P-03), correspondientes a productores queseros artesanales del distrito de Llalli. El muestreo fue no probabilístico por conveniencia, considerando la accesibilidad y disponibilidad de los productores, debido a que gran parte de la actividad quesera se desarrolla de manera artesanal y no existe un registro actualizado de unidades productivas. Las muestras fueron recolectadas siguiendo los criterios establecidos en el Protocolo de muestreo de efluentes y cuerpos receptores en el marco de la autorización sanitaria de vertimiento (DIGESA, 2020). para el muestreo de aguas residuales no domésticas, considerando procedimientos de toma, preservación, conservación, transporte y cadena de custodia para garantizar la representatividad e

integridad de las muestras. La recolección se realizó en dos etapas: la primera destinada a la caracterización fisicoquímica inicial del lactosuero y la segunda para la aplicación de los tratamientos experimentales. Para el desarrollo de la fase experimental se recolectó un volumen total de 60 L de lactosuero, distribuidos en tres bidones de 20 L cada uno, permitiendo la ejecución de los análisis de laboratorio y la evaluación de los tratamientos con CaO y $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$.

Figura 2

Toma de muestra en planta quesera artesanal



Fuente: Elaboración propia (2025).

3.5. Equipos, materiales y reactivos

3.5.1. Equipos

Multiparámetro (HACH HQ2200), estufa (Raypa DOD90), balanza analítica (ADAM 224E), digestor DQO (Rocker – CR25), bureta digital (Witeg), incubadora (DNP 9052A), tes de jarras (BIRD 6 posiciones), agitador magnético (ROCKER) y turbidímetro (EZODO).

3.5.2. Materiales

Vasos de precipitados de 1000 mL, 100 mL y 250 mL clase A, matraces volumétricos de 250 y 100 mL clase A, matraces Erlenmeyer de 250 y 100 mL clase A, probetas de 1000, 500 y 100 ml, micropipetas de 5000, 1000 μ l, pipeta de 10ML, puntas para micropipeta, botellas Winkler de 300ML, bombilla de succión, frasco lavador, espátula, papel filtro Whatman n° 47 y aireador.

3.5.3. Reactivos

Solución tampón pH7, tampón fosfato, sulfato de magnesio (Merck, p.a.), cloruro de calcio CaCl_2 (Merck, p.a.), cloruro férrico FeCl_3 (Merck, p.a.), sulfato de plata Ag_2SO_4 (Merck p.a.), dicromato de potasio $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ (Merck, p.a.), ácido sulfúrico H_2SO_4 (Merck, p.a.), 1,10-fenantrolina monohidratado (Merck, p.a.), sulfato de hierro $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (Merck, p.a.), sulfato ferroso amoniacal $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (J.T. Baker), óxido de manganeso MnO_2 (Merck, p.a.), almidón soluble (Merck, p.a.), tiosulfato sódico Penta hidratado (Merck, p.a.) y agua destilada.

3.6. Procedimiento metodológico

3.6.1. Determinación de la concentración inicial de la materia orgánica, turbidez y sólidos suspendidos totales en los lactosueros generados en el distrito de Llalli.

a. Selección de puntos de muestreo

Los puntos de muestreo fueron seleccionados mediante un muestreo no probabilístico por conveniencia, considerando criterios de accesibilidad, disponibilidad de los productores y representatividad de la actividad quesera en el distrito de Llalli .

Tabla 3

Código y ubicación geográfica de los puntos de muestreo de lactosuero en el distrito de Llalli

Código	Ubicación (UTM)
P – 01	E: 300056, N: 8346700
P – 02	E: 303671, N: 8348803
P – 03	E: 301546, N: 8347530

Nota. Los puntos P-01, P-02 y P-03 corresponden a productores queseros artesanales del distrito de Llalli.

Fuente: Elaboración propia (2025).

b. Recolección de muestras de lactosueros

Para la toma de muestra se siguieron las recomendaciones del protocolo muestreo de efluentes y cuerpos receptores en el marco de la autorización sanitaria de vertimiento (DIGESA, 2020). Comprendida en los siguientes pasos:

Figura 3

Recolección de muestras



Fuente: Elaboración propia (2025).

- **Recipientes para Muestras:** Las muestras se tomaron en frascos de plástico y vidrio previamente limpios y desinfectados. En el caso de análisis de parámetros físicos-químicos, se enjuagaron los frascos tres veces con la muestra antes de tomarla.

Figura 4

Muestras para análisis físico y químico



Fuente: Elaboración propia (2025).

- **Muestreo de Superficie:** Se tomaron las muestras directamente, donde se aseguró que el frasco esté completamente lleno y que no se produzcan burbujas al momento de la toma.
- **Identificación y Codificación de las Muestras:** Cada frasco de muestra fue debidamente rotulado con la siguiente información: número de muestra, origen (nombre del punto de muestreo), fecha y hora de recolección, y nombre del responsable del muestreo.
- **Condiciones de Almacenaje:** Las muestras fueron conservadas a una temperatura aproximada de 4 °C y transportadas al laboratorio para su análisis, siguiendo las recomendaciones de preservación establecidas por (APHA 2017; DIGESA, 2020). El tiempo entre la recolección y el análisis no excedió las 24 horas y se evitó alteraciones en los parámetros analizados.

Figura 5

Almacenamiento de muestras



Fuente: Elaboración propia (2025).

c. Cadena de Custodia: La trazabilidad de las muestras fue garantizada mediante el registro de cadena de custodia conforme a las directrices establecidas por (DIGESA, 2020).

d. Medición de los parámetros de calidad del agua

Los análisis fisicoquímicos fueron realizados siguiendo los procedimientos establecidos en Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales (APHA,2017), descritos en la siguiente tabla:

Tabla 4

Métodos de ensayo utilizados para la determinación de los parámetros fisicoquímicos del lactosuero en el distrito de Llalli, 2025

Parámetro	Unidad	Método
Temperatura	°C	SM - 2550 B método de laboratorio de campo
pH	-	SM 4500 – H
Demanda Química de Oxígeno	mg/L	SM 5220 C Reflujo cerrado, método titulométrico
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L	SM 5210 B Prueba de DBO de 5 días
Turbidez	NTU	SM 2130 B – Método nefelométrico de turbidez
Sólidos totales en suspensión	mg/L	SM 2540 D – Sólidos suspendidos totales secados a 103–105 °C

Fuente: APHA (2017).

e. Análisis de datos

- **Cálculo de concentraciones:** Para cada muestra de lactosuero, se calcularon las concentraciones de materia orgánica (DBO y DQO), turbidez y SST de acuerdo con los métodos descritos.

Figura 6

Análisis físico y químico de las muestras de lactosueros



Fuente: Elaboración propia (2025).

f. Control de calidad y validación de resultado

Se realizaron procedimientos de aseguramiento y control de calidad, incluyendo la calibración previa de los equipos de medición, verificación de condiciones de almacenamiento y seguimiento de los protocolos analíticos establecidos por (APHA 2017), con la finalidad de garantizar la confiabilidad de los resultados obtenidos.

3.6.2. Evaluación de la dosis óptima de óxido de calcio y sulfato de aluminio para la reducción de la materia orgánica

Para el cumplimiento del presente objetivo se realizó de la siguiente manera

a. Preparación de las muestras

- **Selección de muestras:** Se tomaron muestras representativas de lactosueros generados en tres puntos de muestreo en el distrito de Llalli, Melgar (Puno), como se describió en la metodología anterior.
- **Muestreo y almacenamiento:** Las muestras de lactosueros se recolectaron en envases de primer uso de 20L, asegurando que se mantengan a una temperatura de 4°C hasta su procesamiento, para evitar la alteración de los parámetros a medir.

Figura 7

Muestra de lactosueros para tratamiento



Fuente: Elaboración propia (2025).

b. Preparación de soluciones de coagulantes

- **Óxido de Calcio (CaO):** Se preparó una solución de CaO con una dosis de 2 g/L (como se muestra en la tabla 5), ya que esta dosis será constante para todas las muestras.

Figura 8

Ajuste de pH en muestras de lactosueros



Fuente: Elaboración propia (2025).

- **Sulfato de Aluminio ($Al_2(SO_4)_3$):** Se prepararon tres dosis diferentes de $Al_2(SO_4)_3$ según la tabla proporcionada, que incluyen:

Figura 9

Lactosueros con $Al_2(SO_4)_3$ para tratamiento



Fuente: Elaboración propia (2025).

Tabla 5

Dosis de CaO y $Al_2(SO_4)_3$ empleadas en el tratamiento fisicoquímico del lactosuero generado en el distrito de Llalli, 2025

N°	Dosis (CaO) (g)	Dosis ($Al_2(SO_4)_3$) (g)
1	2	0.05
2	2	0.08
3	2	0.10

Fuente: Elaboración propia (2025).

c. Adición de coagulantes a las muestras de lactosueros

- **Muestreo experimental:** Se tomaron tres muestras de lactosueros de 1L en vasos precipitados y, para cada una, se añadió las dosis correspondientes de CaO (2 g/L) y $Al_2(SO_4)_3$ (0.05 g/L, 0.08 g/L y 0.10 g/L).

Figura 10

Muestras de lactosueros para tratamiento



Fuente: Elaboración propia (2025).

- **Prueba de Jarras:** Cada combinación de coagulante y dosis se sometió a la prueba de jarras siguiendo el siguiente proceso:

Tabla 6

Condiciones de agitación y sedimentación aplicadas durante la prueba de jarras para el tratamiento del lactosuero generado en el distrito de Llalli, 2025

Agitación	Tiempo (min)	RPM
Rápida	3	150
Lenta	30	60
Tiempo de sedimentación: 40 minutos		

Fuente: Elaboración propia (2025).

d. Medición de los parámetros de calidad del agua

Una vez que los flóculos se sedimentaron, se midieron los siguientes parámetros para evaluar la eficacia de las dosis de coagulante. Los parámetros se analizaron de acuerdo a los métodos indicados en el objetivo 1.

e. Análisis de los resultados

- **Comparación de resultados:** Se compararon los resultados obtenidos para cada dosis de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ con la dosis constante de CaO (2g/L) en términos de la reducción de turbidez, DBO, DQO y SST.
- **Determinación de la dosis óptima:** Se analizaron cuál de las tres dosis de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ (0.05 g/L, 0.08 g/L o 0.10 g/L) proporciona los mejores resultados en cuanto a la eficacia en la reducción de los parámetros de calidad del agua.

Figura 11

Análisis de lactosueros después del tratamiento



Fuente: Elaboración propia (2025).

f. Validación de los resultados

- **Repetición de pruebas:** Las pruebas se realizaron en triplicado para asegurar que los resultados sean reproducibles y fiables.
- **Control de variables:** Se mantuvieron constantes otras condiciones como la temperatura, el pH y el tiempo de agitación, para asegurar que las variaciones observadas se deban únicamente a las dosis de coagulantes.

Tabla 7

Codificación de los tratamientos experimentales aplicados al lactosuero generado en el distrito de Llalli, 2025.

N°	Código		
	Tratamiento 1	Tratamiento 2	Tratamiento 3
1	T1D1	T2D1	T3D1
2	T1D2	T2D2	T3D2
3	T1D3	T2D3	T3D3

Fuente: Elaboración propia (2025).

3.6.3. Comparación de la eficacia del óxido de calcio y el sulfato de aluminio en la reducción de materia orgánica presente en los lactosueros generados en el distrito de Llalli.

a. Análisis comparativo de la eficacia

- **Comparación de la eficacia:** Se compararon los resultados de los diferentes tratamientos aplicados:

Tratamiento con CaO

Tratamientos con $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ en tres dosis diferentes (0.05 g/L, 0.08 g/L, 0.10 g/L).

- **Cálculo de la reducción:** Para cada parámetro medido (turbidez, DBO, DQO, SST), se calculó el porcentaje de reducción en comparación con los valores iniciales de los lactosueros. Fórmula para el cálculo de la reducción porcentual o reducción:

$$\text{Reducción porcentual} = \frac{(\text{Valor inicial} - \text{Valor final})}{\text{Valor inicial}} \times 100$$

b. Validación de resultados

- **Repetición:** El experimento se realizó en triplicado para asegurar que los resultados sean reproducibles y confiables.
- **Control de variables:** Se mantuvieron constantes factores como la temperatura, el pH y el tiempo de agitación, para garantizar que las diferencias observadas se deban a los tratamientos aplicados.

3.7.Evaluación estadística

3.7.1. Metodología de análisis estadístico

El análisis estadístico de los datos se realizó mediante estadística descriptiva y modelos de regresión cuadrática, con la finalidad de evaluar la relación entre la dosis de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ y la variación de los parámetros fisicoquímicos de los lactosueros, tales como sólidos suspendidos totales (SST), turbidez, demanda química de oxígeno (DQO) y demanda bioquímica de oxígeno (DBO). Para ello, se consideraron indicadores de bondad de ajuste como el coeficiente de correlación (R), el coeficiente de determinación (R^2) y el nivel de significancia estadística ($p < 0.05$), lo que permitió determinar la existencia de una relación no lineal entre las variables y validar la influencia de la dosis del coagulante sobre la eficiencia del tratamiento. Asimismo, este análisis permitió identificar el comportamiento cuadrático de las variables y establecer la dosis óptima correspondiente al punto de mínima concentración de los contaminantes. El procesamiento de los datos se realizó mediante el software estadístico SPSS.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. Determinación de la concentración inicial de la materia orgánica, turbidez y sólidos suspendidos totales en los lactosueros generados en el distrito de Llalli.

Los resultados obtenidos del análisis realizado son los siguientes

Tabla 8

Resultados de los parámetros fisicoquímicos iniciales del lactosuero generado en el distrito de Llalli, 2025

Parámetro	Unidad	P – 01	P – 02	P – 03	VMA
Temperatura	°C	18.4	18.6	17.0	-
Solidos totales en suspensión	mg/L	10520.0	9325.0	8707.0	500.0
Turbidez	NTU	4200.0	3900.0	3500.0	-
Potencial de hidrógeno	Unid.ph	4.2	5.3	5.8	6.5-8.5
Demanda química de oxígeno	mg/L	8000.0	4500.0	5300.0	1000.0
Demanda bioquímica de oxígeno	mg/L	4800.0	3010.0	2800.0	500.0

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados del laboratorio LAQUAMEQ (2025).

La tabla 7 presenta los resultados de la concentración inicial de la materia orgánica, turbidez y SST en los lactosueros generados en el distrito de Llalli. Observando valores iniciales de hasta 10520 mg/L de SST, 4200 NTU de turbidez, 8000 mg/L de DQO y 4800 mg/L de DBO, lo que confirma su alto potencial de impacto ambiental y la necesidad de aplicar tratamientos eficientes antes de su vertimiento. Los valores de temperatura oscilan entre 17.0°C y 18.6°C en las tres muestras (P-01, P-02 y P-03), es un parámetro clave en el tratamiento de aguas residuales, ya que influye directamente en la actividad microbológica y en la velocidad de las reacciones químicas (Al-Tayawi et al., 2023). En este caso, los valores son relativamente bajos, lo que es característico de las condiciones ambientales frías de la región de Llalli, Melgar, que puede afectar la eficacia de algunos

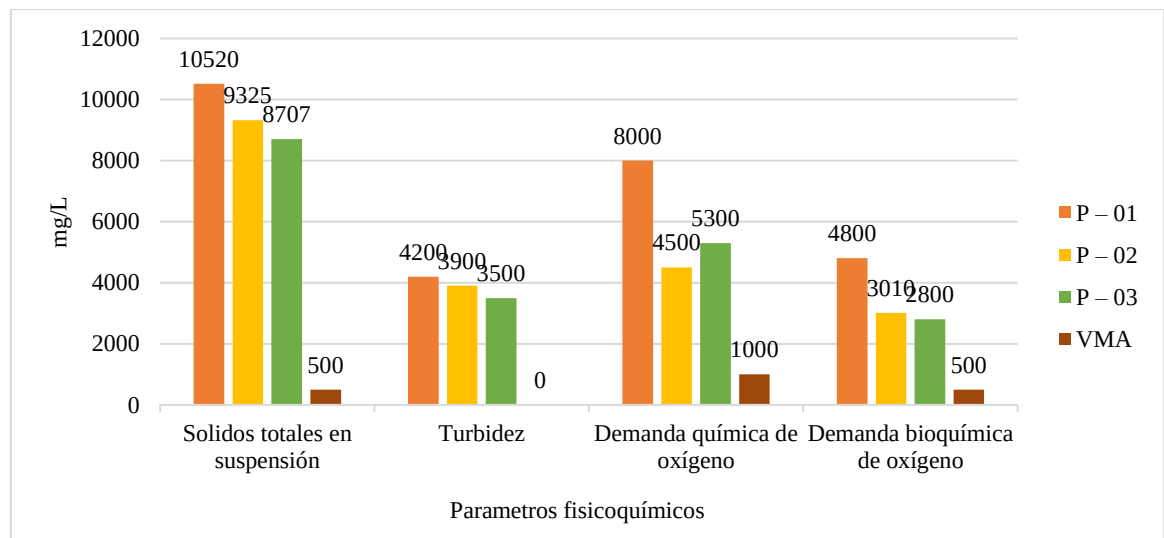
procesos biológicos en el tratamiento de los lactosueros. Los valores de sólidos totales en suspensión muestran una gran variabilidad entre las muestras, siendo la más alta en P-01 (10520 mg/L), seguida de P-02 (9325 mg/L) y P-03 (8707 mg/L). Este parámetro indica la cantidad de partículas suspendidas en el agua, como materia orgánica, grasas y proteínas (Hernández, 2025). El alto valor en P-01 se debe a una mayor producción de lactosueros en esa zona de muestreo. El valor relativamente menor en P-03 indica que los lactosueros provenientes de ese punto tienen menor carga orgánica y la producción no es constante. Según los VMA los resultados obtenidos en todas las muestras presentaron concentraciones mucho más altas de sólidos suspendidos, lo que indica una alta carga de materia orgánica en los efluentes generados. Esto resalta la necesidad de un tratamiento adecuado para reducir esta carga antes de ser vertida en cuerpos de agua. La turbidez se encuentra en un rango de 3500 NTU a 4200 NTU. La turbidez alta en las tres muestras indica una alta concentración de partículas suspendidas en los lactosueros, lo cual es un indicativo de que los procesos de coagulación y floculación son necesarios para reducir la cantidad de partículas no visibles que afectan la claridad del agua (Lama, 2022). El valor más alto en P-01 (4200 NTU) sugiere que esa muestra tiene una mayor carga de material suspendido y podría necesitar un tratamiento más intensivo para lograr la reducción de turbidez. Los lactosueros en esta zona de estudio presentan un pH ácido, lo que sugiere que el proceso de producción de queso genera un efluente con una alta acidez, el pH ácido de las muestras está fuera del rango óptimo (6.5 - 8.5) para la aplicación de ciertos coagulantes y podría indicar que el tratamiento necesario debe incluir ajustes en el pH, si se requieren coagulantes alcalinos como el CaO, que aumentan el pH, lo que sugiere que este punto podría beneficiarse de un ajuste de pH para optimizar la coagulación y floculación.

(Vielman, 2019). Los valores de DQO varían entre 4500 mg/L y 8000 mg/L. Este parámetro mide la cantidad total de oxígeno necesario para oxidar la materia orgánica presente (Kaur, 2021). Los valores elevados indican una alta carga de materia orgánica en los lactosueros, lo que refuerza la necesidad de aplicar coagulantes eficaces. La muestra P-01 (8000 mg/L) presenta la mayor carga de contaminantes, lo que resulta de una mayor actividad microbiana y de un mayor volumen de lactosueros generados, estos valores de DQO en todas las muestras exceden enormemente el valor máximo admisible (1000 mg/L). Este parámetro muestra que los lactosueros tienen una gran carga de materia orgánica, lo cual representa un desafío para el tratamiento, ya que se requiere un alto consumo de oxígeno para oxidar los contaminantes. La reducción de DQO será un objetivo clave del tratamiento con coagulantes. Los valores de DBO están en un rango de 2800 mg/L a 4800 mg/L. Este parámetro mide la materia orgánica biodegradable y se usa como indicador de la contaminación orgánica (Al-Tayawi et al., 2023). Los valores más altos en P-01 y P-02 indican que esas muestras contienen mayor materia orgánica susceptible de ser descompuesta por microorganismos, mientras que la P-03 muestra una menor carga orgánica biodegradable, lo cual implicaría un proceso de tratamiento más eficiente o un origen más limpio de los lactosueros en ese punto. Los valores de DBO en las tres muestras también superan el VMA (500 mg/L). Este alto nivel de DBO indica que los lactosueros son altamente contaminantes y tienen un gran potencial de contaminación biológica si no se tratan adecuadamente antes de ser vertidos en cuerpos de agua. Los resultados obtenidos coinciden con lo reportado por Kaur (2021), quien señala que las aguas residuales de la industria láctea presentan elevados niveles de DBO y DQO debido a la presencia de materia orgánica proveniente de los procesos productivos y de limpieza. De manera similar, Ortiz

(2018) reportó que el lactosuero generado en la industria quesera presenta una alta carga orgánica, constituyéndose como una fuente potencial de contaminación cuando es vertido sin tratamiento previo. Asimismo, Godoy (2019) indica que este tipo de efluentes puede generar impactos negativos sobre la calidad del agua debido a su elevado contenido de materia orgánica y sólidos suspendidos. En conjunto, estos antecedentes respaldan los resultados obtenidos sobre las características fisicoquímicas observadas en los lactosueros de Llalli son consistentes con la problemática reportada en otros estudios nacionales e internacionales.

Figura 12

Análisis comparativo de parámetros en lactosueros según VMA



Fuente: Elaboración propia (2025).

En la figura 12 se muestra la comparación de los parámetros de lactosueros (sólidos suspendidos totales, turbidez, DQO, y DBO) obtenidos de tres puntos de muestreo (P-01, P-02, P-03). Las barras representan los valores de cada parámetro para cada muestra y también los Valores Máximos Admisibles según las normativas ambientales. Las barras marrones corresponden a los límites establecidos para los sólidos suspendidos totales (500 mg/L), DBO (500 mg/L), DQO (1000 mg/L), respectivamente. Esto permite visualizar las

variaciones entre las muestras y evaluar si los parámetros superan los límites establecidos, destacando la necesidad de un tratamiento adecuado para reducir los niveles de contaminación en los lactosueros.

4.2. Evaluación de la dosis óptima de óxido de calcio y sulfato de aluminio para la reducción de la materia orgánica

Se evaluaron tres dosis de $Al_2(SO_4)_3$: D1 (50 mg/L), D2 (80 mg/L) y D3 (100 mg/L), empleando previamente una dosis constante de CaO 2g/L; realizando tres repeticiones experimentales (T1, T2 y T3) para cada dosis.

Tabla 9

Resultados de los parámetros fisicoquímicos obtenidos en la repetición 1 del tratamiento con CaO (2 g/L) y $Al_2(SO_4)_3$ en lactosuero generado en el distrito de Llalli, 2025

Parámetro	Unidad	T1D1	T1D2	T1D3
Temperatura	°C	16.5	17.3	16.9
Solidos totales en suspensión	mg/L	2200.0	625.0	953.0
Turbidez	NTU	1600.0	480.0	840.0
Potencial de hidrógeno	Unid. de pH	6.8	6.9	6.8
Demanda química de oxígeno	mg/L	1813.0	1493.0	1707.0
Demanda bioquímica de oxígeno	mg/L	1050.0	760.0	850.0

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados del laboratorio LAQUAMEQ (2025).

La Tabla 9 presenta los resultados obtenidos en la repetición 1 del tratamiento con CaO (2g/L) y tres dosis de $Al_2(SO_4)_3$: D1 (50 mg/L), D2 (80 mg/L) y D3 (100 mg/L). La temperatura de las muestras no muestra grandes variaciones entre los tratamientos, con un rango de entre 16.5°C y 17.3°C. Este resultado es típico en tratamientos de laboratorio donde la temperatura suele mantenerse estable. La ligera variación puede ser el resultado de la manipulación y el tiempo de exposición de las muestras a las condiciones ambientales. Los SST presentaron diferencias entre las dosis evaluadas, observándose la menor

concentración residual en T1D2 (625 mg/L), seguida de T1D3 (953 mg/L) y T1D1 (2200 mg/L). Estos resultados evidencian una mayor eficiencia de reducción de SST con la dosis intermedia de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, siendo un indicador positivo, lo que indica una mejor formación y sedimentación de flóculos durante el proceso de coagulación-floculación (Bairagi & Rastogi, 2015). La turbidez muestra una reducción entre los tratamientos con T1D1 (1600 NTU) y T1D2 (480 NTU), lo que indica que el $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, en la dosis de 50 mg/L ha tenido un impacto importante en la reducción de partículas suspendidas. Este cambio es positivo, ya que la turbidez está directamente relacionada con la cantidad de partículas en suspensión en el agua, y su reducción implica una mejora en la calidad del agua tratada. La dosis más alta de sulfato (T1D3) no logró reducir la turbidez tanto como las dosis menores, lo que podría indicar que una dosis elevada de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, no siempre mejora la eficiencia de coagulación y puede incluso causar una sobrecarga de flóculos que no se eliminan de manera eficiente (Tahraoui et al., 2024). El pH de las muestras, muestra una ligera variación entre los tratamientos, pero sigue estando dentro de un rango ligeramente ácido. Esto es esperado, ya que el CaO se ha utilizado previamente para alcalinizar las muestras, lo que eleva el pH, y el $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ no tiene un impacto tan grande sobre el pH. La ligera variación en pH entre las dosis de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ no parece ser mucha, lo que indica que los ajustes de pH previos fueron adecuados para la coagulación sin causar cambios drásticos en el entorno de los lactosueros (Mulyadi et al., 2020). La DQO muestra una reducción general en todas las dosis de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ con un descenso más pronunciado en T1D2 (80 mg/L), pasando de 1813 mg/L a 1493 mg/L. Esto refleja que el tratamiento con ha logrado reducir la carga orgánica biodegradable, lo cual es positivo. Sin embargo, la menor reducción en T1D3 (100 mg/L) podría indicar que dosis más altas de sulfato no siempre

producen una mayor reducción de la DQO, o que puede haber una sobrecarga de flóculos que no se eliminan eficientemente (Huaman. 2024). La DBO sigue una tendencia similar a la DQO, con una reducción notable en TID2 (80 mg/L), donde se pasó de 1050 mg/L a 760 mg/L, lo que sugiere una mejora en la calidad del agua tratada. La reducción en TID3 es menor, lo que podría ser un indicio de que la dosis más alta de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ no tiene una relación directa con la mejora en la reducción de materia orgánica biodegradable. Este comportamiento también puede sugerir que una dosis excesiva de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ puede no ser tan eficiente en la reducción de la DBO como dosis más bajas. Respecto al tratamiento aplicado, la combinación de CaO con $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ mostró resultados favorables, siendo la dosis D2 (80 mg/L) la que presentó el mejor comportamiento entre los tratamientos evaluados. Este resultado guarda relación con lo reportado por Guzmán (2023), quien demostró que el $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ presenta alta eficiencia en la reducción de materia orgánica en aguas residuales. Asimismo, coincide con (Huaman. 2024), quien obtuvo resultados favorables en la reducción de SST, DQO y DBO mediante procesos de coagulación-floculación empleando $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$.

Tabla 10

Resultados de los parámetros fisicoquímicos obtenidos en la repetición 2 del tratamiento con CaO (2 g/L) y $Al_2(SO_4)_3$ en lactosuero generado en el distrito de Llalli, 2025

Parámetro	Unidad	T2D1	T2D2	T2D3
Temperatura	°C	16.1	16.8	16.4
Solidos totales en suspensión	mg/L	2740.0	830.0	1120.0
Turbidez	NTU	1820.0	625.0	910.0
Potencial de hidrógeno	Unid. de pH	7.1	6.8	7.0
Demanda química de oxígeno	mg/L	2030.0	1750.0	1925.0
Demanda bioquímica de oxígeno	mg/L	1240.0	825.0	990.0

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados del laboratorio LAQUAMEQ (2025).

La Tabla 10 presenta los resultados obtenidos en la repetición 2 del tratamiento con CaO (2g/L) y tres dosis de $Al_2(SO_4)_3$: D1 (50 mg/L), D2 (80 mg/L) y D3 (100 mg/L). La temperatura presentó una ligera variabilidad entre las dosis evaluadas, pero todas se mantienen dentro de un rango cercano, entre 16.1°C y 16.8°C. La reducción en SST es claramente notable entre T2D1 (2740 mg/L) y T2D2 (830 mg/L), y en menor medida entre T2D2 y T2D3 (1120 mg/L). Esto sugiere que el $Al_2(SO_4)_3$ ha tenido un impacto en la coagulación y posterior reducción de partículas suspendidas, aunque la dosis más alta de $Al_2(SO_4)_3$ (100 mg/L) no ha mostrado la misma eficacia en la reducción de sólidos que las dosis más bajas. Esta variabilidad podría indicar que las dosis intermedias (80 mg/L) pueden ser más eficientes que las más altas en términos de reducción de sólidos suspendidos (Tahraoui et al., 2024). La turbidez presentó una notable reducción entre T2D1 (1820 NTU) y T2D2 (625 NTU), lo que indica que la coagulación con $Al_2(SO_4)_3$ ha sido efectiva en la eliminación de partículas en suspensión. Sin embargo, la turbidez en T2D3 (910 NTU) ha sido menos efectiva en la reducción, lo que sugiere que las dosis más altas de $Al_2(SO_4)_3$ pueden no ser las más eficientes en este parámetro. Este comportamiento

es similar al observado en los SST, donde las dosis intermedias mostraron mejor rendimiento (Tahraoui et al., 2024). El pH de las muestras indica una ligera variabilidad entre los tratamientos, con un descenso en T2D2 (6.8) respecto a T2D1 (7.1) y T2D3 (7.0). Estas pequeñas fluctuaciones en el pH son esperadas, ya que el $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ tiene un efecto ligeramente ácido, pero no causan cambios drásticos que puedan afectar negativamente el proceso de coagulación. Los valores de pH siguen estando dentro del rango adecuado para la coagulación-floculación, y no se espera que el pH tenga un impacto negativo en la efectividad de los tratamientos (Mulyadi et al., 2020). La reducción de la DQO es evidente entre T2D1 (2030 mg/L) y T2D2 (1750 mg/L), lo que indica que el tratamiento con $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ha sido eficaz en la reducción de materia orgánica en los lactosueros. Sin embargo, T2D3 muestra un valor ligeramente más alto (1925 mg/L), lo que sugiere que, en este caso, una dosis más alta de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ no tiene el mismo impacto en la reducción de materia orgánica. Esto puede deberse a la sobrecarga de coagulante, lo que podría reducir la eficiencia del tratamiento al no permitir una reducción efectiva de la carga orgánica (Guzmán, 2023). La DBO muestra una reducción entre T2D1 (1240 mg/L) y T2D2 (825 mg/L), lo que indica que la dosis de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ de 80 mg/L fue eficaz en la reducción de la materia orgánica biodegradable. Sin embargo, T2D3 (100 mg/L) presenta una disminución menos pronunciada (990 mg/L), lo que podría indicar que las dosis altas de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ no son tan eficientes para reducir la materia orgánica biodegradable. Este comportamiento es similar al observado con otros parámetros, como la turbidez y la demanda química de oxígeno (DQO), sugiriendo que una dosis intermedia de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ (80 mg/L) puede ser más eficiente para la coagulación y reducción de contaminantes en los lactosueros. Respecto al segundo tratamiento, los resultados obtenidos evidencian que la dosis de 80

mg/L de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ presentó el mejor desempeño en la reducción de SST, turbidez, DQO y DBO. Estos resultados son consistentes con lo reportado por Guzmán (2023), quien señala que el $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ presenta alta eficiencia en la reducción de materia orgánica en aguas residuales. Asimismo, guardan relación con los hallazgos de Huaman (2024), quien obtuvo reducciones de SST, DQO y DBO mediante procesos de coagulación-floculación.

Tabla 11

Resultados de los parámetros fisicoquímicos obtenidos en la repetición 3 del tratamiento con CaO (2 g/L) y $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ en lactosuero generado en el distrito de Llalli, 2025

Parámetro	Unidad	T3D1	T3D2	T3D3
Temperatura	°C	15.9	16.3	16.9
Sólidos totales en suspensión	mg/L	2240.0	610.0	950.0
Turbidez	NTU	1590.0	518.0	870.0
Potencial de hidrógeno	Unid. de pH	7.2	7.1	6.9
Demanda química de oxígeno	mg/L	1850.0	1230.0	1640.0
Demanda bioquímica de oxígeno	mg/L	910.0	615.0	750.0

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados del laboratorio LAQUAMEQ (2025).

La Tabla 11 presenta los resultados obtenidos en la repetición 3 del tratamiento con CaO (2g/L) y tres dosis de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$: D1 (50 mg/L), D2 (80 mg/L) y D3 (100 mg/L). La temperatura de las muestras no mostró grandes diferencias entre las dosis evaluadas, con una ligera variación entre 15.9°C y 16.9°C. Estos valores se encuentran dentro de un rango aceptable, y la ligera variabilidad puede estar asociada a las condiciones ambientales. Los SST muestran una reducción en T3D2 (610 mg/L), lo que indica que el tratamiento con 80 mg/L de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ fue eficaz en la coagulación de los lactosueros. La reducción en T3D3 (950 mg/L) es menos pronunciada, lo que sugiere que la dosis más alta de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ no ha sido tan efectiva para reducir los sólidos suspendidos como la dosis intermedia (80 mg/L).

Esta tendencia refleja la importancia de ajustar la dosis para obtener la máxima eficiencia en la reducción de sólidos suspendidos (Bairagi & Rastogi, 2015). La turbidez muestra una reducción en T3D2 (518 NTU), similar a lo que se observa en los SST. Esto indica que la dosis de 80 mg/L de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ha sido eficaz en la reducción de la turbidez, lo cual está relacionado con la reducción de partículas suspendidas. La turbidez en T3D3 (870 NTU) no muestra la misma eficacia de reducción, sugiriendo que la sobrecarga de sulfato no es tan eficiente como las dosis intermedias (Tahraoui et al., 2024). El pH presenta ligeras variaciones entre las dosis de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, pero sigue dentro de un rango aceptable para la coagulación y floculación. El pH en T3D3 es más ácido (6.9), lo que puede ser una consecuencia de la mayor dosis de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, que tiene un efecto ligeramente ácido sobre la muestra. Sin embargo, la variabilidad en el pH no parece tener un impacto negativo en el tratamiento, ya que todos los valores se encuentran dentro del rango óptimo para la coagulación (Mulyadi et al., 2020). La DQO muestra una reducción en T3D2 (1230 mg/L), lo que indica que la dosis de 80 mg/L de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ fue eficaz en la reducción de materia orgánica. Sin embargo, en T3D3 (1640 mg/L), la reducción es menos pronunciada, sugiriendo que las dosis más altas no siempre son más eficaces para disminuir la carga orgánica en los lactosueros. Este comportamiento es consistente con la tendencia observada en otros parámetros, como los SST y la turbidez (Guzmán, 2023). La DBO también muestra una reducción en T3D2 (615 mg/L), lo que indica que la dosis de 80 mg/L de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ fue eficaz para reducir la materia orgánica biodegradable. La dosis de 100 mg/L (T3D3) muestra una reducción menor (750 mg/L), lo que podría indicar que una sobrecarga no mejora la reducción de materia orgánica y puede ser menos eficiente (Huaman, 2024). Los resultados obtenidos en la tercera repetición evidencian que la dosis intermedia de

$Al_2(SO_4)_3$ (80 mg/L) mantuvo el mejor desempeño en la reducción de SST, turbidez, DQO y DBO. Este comportamiento coincide con lo señalado por Bairagi & Rastogi (2015) y Ramírez (2019), quienes indican que la eficiencia de los procesos de coagulación-floculación depende de la optimización de la dosis aplicada y de las condiciones del medio, más que del incremento indiscriminado del coagulante.

Tabla 12

Valores promedio de los parámetros fisicoquímicos obtenidos mediante el tratamiento con CaO (2 g/L) y $Al_2(SO_4)_3$ en lactosuero generado en el distrito de Llalli, 2025

Parámetro	Unidad	P - 01	D1	D2	D3	VMA D.S. N° 010 - 2019
Temperatura	°C	18.4	16.2	16.8	16.7	-
Sólidos totales en suspensión	mg/L	10520	2393.3	688.3	1007.7	500
Turbidez	NTU	4200	1670.0	541.0	873.3	-
Potencial de hidrógeno	pH	4.2	7.0	6.9	6.9	6.5 – 8.5
Demanda química de oxígeno	mg/L	8000	1897.7	1491.0	1757.3	1000
Demanda bioquímica de oxígeno	mg/L	4800	1066.7	733.3	863.3	500

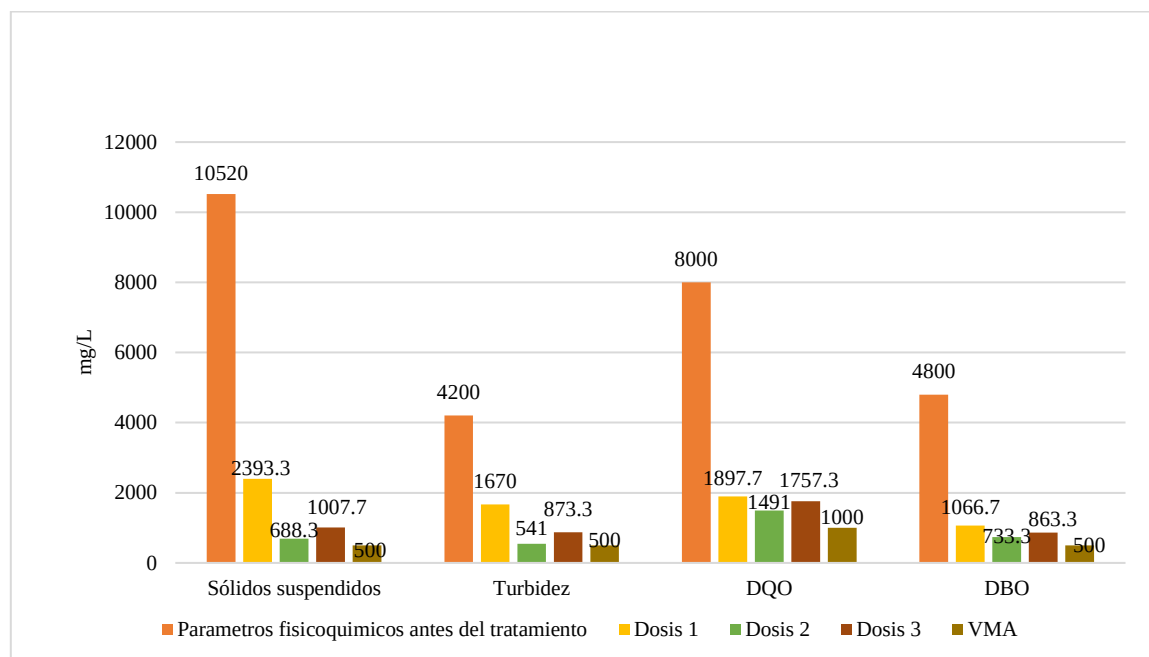
Fuente: Elaboración propia con base en los resultados del laboratorio LAQUAMEQ (2025).

La Tabla 12 presenta los valores promedio obtenidos para los parámetros fisicoquímicos evaluados después de la aplicación de las diferentes dosis de $Al_2(SO_4)_3$. En comparación con la muestra inicial (P-01), se observa una reducción de los SST, turbidez, DQO y DBO en todos los tratamientos. La dosis D2 (80 mg/L) presentó los menores valores residuales de SST (688.3 mg/L), turbidez (541.0 NTU), DQO (1491.0 mg/L) y DBO (733.3 mg/L), evidenciando un mejor desempeño respecto a las dosis D1 (50 mg/L) y D3 (100 mg/L). Respecto al cumplimiento de los VMA, los SST, DQO y DBO mostraron reducciones importantes; sin embargo, sus concentraciones finales aún superaron los límites

establecidos por la normativa vigente. Por otro lado, el pH se mantuvo dentro del rango permitido (6.5–8.5), favoreciendo las condiciones necesarias para el proceso de coagulación-floculación. Los resultados evidencian que la dosis de 80 mg/L fue la más eficiente para la reducción de la carga contaminante presente en los lactosueros.

Figura 13

Comparación de parámetros fisicoquímicos iniciales antes y después de los tratamientos



Fuente: Elaboración propia (2025).

La figura 13 muestra la comparación de los parámetros fisicoquímicos evaluados en el lactosuero del distrito de Llalli, considerando la muestra inicial, las tres dosis de tratamiento y los valores de referencia establecidos. Los resultados evidencian que el efluente presenta una elevada carga contaminante inicial, con valores de hasta 10520 mg/L de sólidos suspendidos totales, 4200 NTU de turbidez, 8000 mg/L de DQO y 4800 mg/L de DBO, lo que confirma su alto potencial de impacto ambiental y la necesidad de aplicar tratamientos previos antes de su disposición final. Estos valores son consistentes con lo reportado en la literatura para efluentes de la industria láctea, donde se ha documentado que la alta carga orgánica está asociada al uso intensivo de agua en los procesos de

producción y limpieza, así como a la presencia de compuestos biodegradables propios del lactosuero. En ese sentido, los antecedentes de Kaur (2021), Gamarra (2018) y Godoy (2019) confirman que esta problemática es recurrente tanto a nivel nacional como internacional.

Respecto al tratamiento aplicado mediante la combinación de CaO y $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, se observa una reducción progresiva de todos los parámetros evaluados en las distintas dosis, destacando la dosis D2 (80 mg/L) como la más eficiente en el conjunto de variables analizadas. En esta condición se alcanzaron remociones de 93.5% en sólidos suspendidos, 87.1% en turbidez, 81.4% en DQO y 84.7% en DBO, evidenciando un mejor desempeño en comparación con las demás dosis. Este comportamiento es consistente con lo reportado por Guzmán (2023), quien también obtuvo altas eficiencias de reducción utilizando $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ en aguas residuales, confirmando su capacidad para reducir carga orgánica.

Asimismo, los resultados guardan relación con lo señalado por Huaman (2024), quien reportó menores eficiencias en sistemas de coagulación-floculación $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, lo cual podría atribuirse a la ausencia de un acondicionamiento previo del pH. En contraste, en este estudio el uso de CaO permitió ajustar el pH inicial ácido del lactosuero hasta valores cercanos a la neutralidad, favoreciendo la formación de flóculos y mejorando el desempeño del coagulante. Este comportamiento también ha sido descrito por Mulyadi et al. (2020), quienes indican que la combinación de CaO y $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ mejora las condiciones del medio y optimiza la reducción de turbidez y materia orgánica.

Por otro lado, se evidencia que el incremento de la dosis no garantiza una mayor eficiencia en la reducción de contaminantes, ya que la dosis D3 no supera el desempeño de la dosis intermedia. Este comportamiento refleja una relación no lineal entre la dosis del coagulante

y la eficiencia del tratamiento, lo cual coincide con lo reportado por Vielman (2019), quienes señalan que la eficiencia del proceso depende de la optimización de variables como dosis y pH, más que del incremento continuo del reactivo. En ese sentido, los resultados permiten establecer que la dosis óptima del tratamiento fue 80 mg/L, al lograr el mejor balance entre reducción de contaminantes y cumplimiento de los valores de referencia.

4.3. Comparación de la eficacia del óxido de calcio y el sulfato de aluminio en la reducción de materia orgánica presente en los lactosueros generados en el distrito de Llalli.

Tabla 13

Porcentaje de reducción de los parámetros fisicoquímicos obtenidos mediante el tratamiento con CaO y $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ en lactosuero generado en el distrito de Llalli, 2025

Parámetro	Unidad	D1	D2	D3
Sólidos totales en suspensión	%	77.2	93.5	90.4
Turbidez	%	60.2	87.1	79.2
Demanda química de oxígeno	%	76.3	81.4	78.0
Demanda bioquímica de oxígeno	%	77.8	84.7	82.0

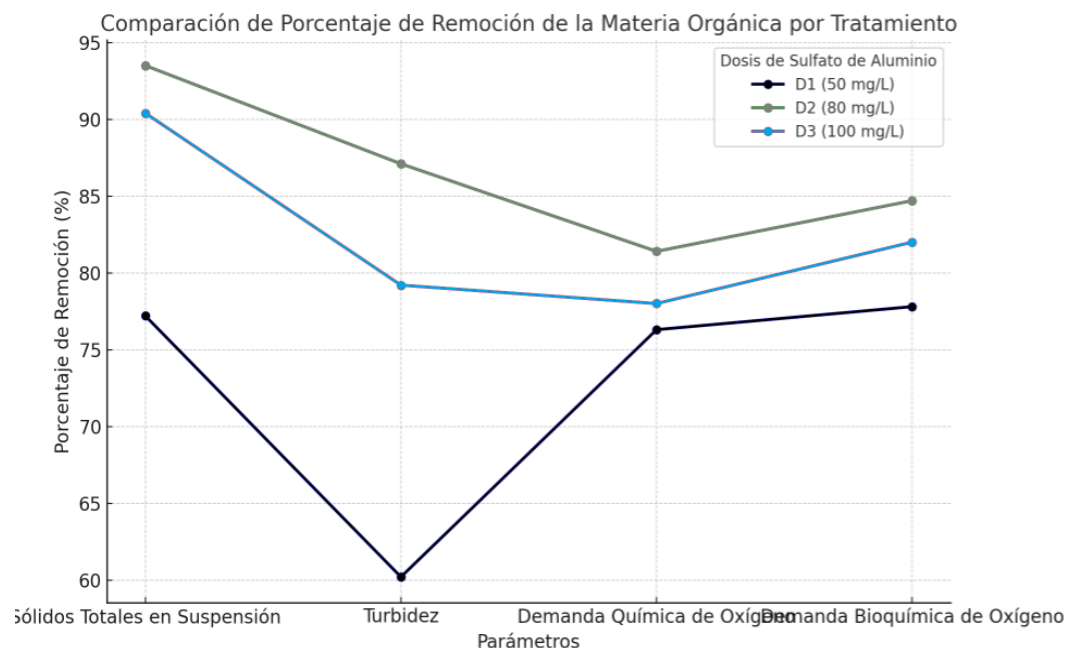
Fuente: Elaboración propia con base en los resultados del laboratorio LAQUAMEQ (2025).

Los datos presentados en la Tabla 13 muestran los porcentajes de reducción de la materia orgánica en los lactosueros después de aplicar los tratamientos con CaO y $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, para los parámetros de Sólidos Totales en Suspensión (SST), Turbidez, Demanda Química de Oxígeno (DQO) y Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO). La reducción de los sólidos totales en suspensión (SST) muestra una gran efectividad del tratamiento con $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$. El tratamiento con 80 mg/L (D2) fue el más eficiente, alcanzando una reducción del 93.5%, lo que indica que esta dosis de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ coaguló y eliminó eficazmente las partículas suspendidas en los lactosueros. Aunque la dosis de 50 mg/L (D1) tuvo una reducción más baja (77.2%). La dosis de 100 mg/L (D3) también muestra una alta reducción (90.4%), lo

que sugiere que una sobrecarga de coagulante podría no ser tan efectiva como las dosis intermedias. La reducción de la turbidez también muestra que el tratamiento con 80 mg/L de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ es el más eficaz (87.1%), lo que refleja una mejor eliminación de las partículas suspendidas que causan turbidez. Sin embargo, en D3 (100 mg/L), la reducción de turbidez no aumenta proporcionalmente, alcanzando solo el 79.2%, lo que sugiere que un exceso de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ puede no ser tan eficiente, posiblemente debido a una sobrecarga de coagulante que afecta la reducción de las partículas más finas. La dosis más baja (D1) tuvo una reducción del 60.2%, lo que también indica que el $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ es efectivo, pero no tan eficiente como las dosis intermedias. La reducción de la DQO muestra que las dosis de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ son efectivas en reducir la carga orgánica de los lactosueros, con D2 (80 mg/L) mostrando la mejor reducción (81.4%). Esto indica que esta dosis tiene un impacto significativo en la reducción de la materia orgánica biodegradable. En D1 (50 mg/L), la reducción de DQO es 76.3%, lo que aún muestra una reducción, pero no tan eficiente como en D2. En D3 (100 mg/L), la reducción es 78.0%, lo que sugiere que dosis más altas no mejoran la reducción de DQO en comparación con dosis intermedias. La reducción de la DBO muestra que el tratamiento con 80 mg/L de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ (D2) es el más eficiente, con una reducción de 84.7%, lo que sugiere que esta dosis es la óptima para reducir la materia orgánica biodegradable en los lactosueros. D1 (50 mg/L) también muestra una reducción alta (77.8%), mientras que D3 (100 mg/L), aunque efectiva (82.0%), no alcanza los mismos niveles de eficiencia que D2. Esto indica que las dosis más altas de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ pueden no ser tan efectivas para reducir la DBO y que una dosis intermedia es más adecuada para maximizar la reducción.

Figura 14

Porcentaje de reducción de la materia orgánica, turbidez y SST.



Fuente: Elaboración propia (2025).

4.4. Prueba de hipótesis

4.4.1. Existe una dosis óptima específica de sulfato de aluminio que maximiza la reducción de sólidos totales suspendidos en los lactosueros.

Tabla 14

Resumen del modelo de regresión cuadrática para la reducción de SST mediante el tratamiento con $Al_2(SO_4)_3$ en lactosuero generado en el distrito de Llalli, 2025

R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Desv. Error de estimación
0,994	0,987	0,984	470,372

La variable independiente es Dosis ($Al_2(SO_4)_3$)(g).

Fuente: Elaboración propia (2025).

a. Bondad de ajuste

El R cuadrado de 0,987 indica que el modelo de regresión cuadrática es capaz de explicar aproximadamente el 98,7% de la variabilidad observada en la reducción de sólidos totales suspendidos en los lactosueros en función de la dosis de

$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$. Esto evidencia que el modelo presenta un ajuste muy alto y una excelente capacidad explicativa.

b. Coeficiente de correlación R

El valor de R es 0,994, lo que expresa que existe una correlación muy alta entre la dosis de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ y la reducción de sólidos totales suspendidos en los lactosueros.

Tabla 15

Coefficientes del modelo de regresión cuadrática de la dosis de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ sobre los SST del lactosuero generado en el distrito de Llalli, 2025

	Coeficientes				
	Coeficientes no estandarizados		estandarizados		
	B	Desv. Error	Beta	t	Sig.
Dosis $(\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3)(\text{g})^2$	1168242,1	127242,947	1,231	9,181	0,000
(Constante)	9530,8	270,385		35,249	0,000

Fuente: Elaboración propia (2025).

Para la variable Dosis de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ (g)²: el coeficiente *B* es 1168242,1; lo que indica que por cada incremento de una unidad en el cuadrado de la dosis de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, los sólidos totales suspendidos estimados varían en 1168242,1 unidades, manteniendo constantes los demás factores. El valor de Sig. es 0,000, que es menor que 0,05, lo que indica que este efecto es estadísticamente significativo.

Constante: el coeficiente *B* es 9530,8, que representa el valor esperado de los sólidos totales suspendidos cuando la dosis de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ es igual a 0 g. El valor de Sig. asociado a este coeficiente es 0,000, menor que 0,05, lo que indica que este coeficiente es estadísticamente significativo.

Según estos resultados, la ecuación de regresión queda de la siguiente manera:

$$Y = \beta_0 + \beta_2 X^2$$

Reemplazando los coeficientes:

$$Y = 9530,8 + 1168242,1 X^2$$

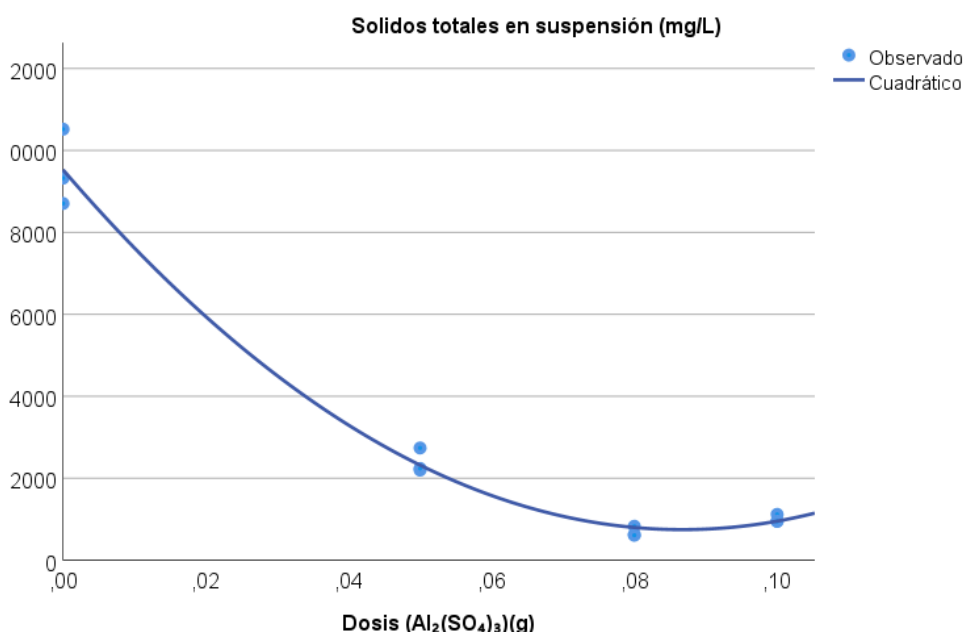
Por lo tanto, la ecuación del modelo de regresión cuadrática quedaría:

$$\text{Sólidos totales suspendidos} = 9530,8 + 1168242,1\text{Dosis}^2$$

Esta ecuación indica que la relación entre la dosis de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ y los sólidos totales suspendidos sigue una tendencia cuadrática. El coeficiente positivo del término cuadrático muestra que la curva tiene forma parabólica abierta hacia arriba, lo que sugiere la existencia de un punto mínimo dentro del rango evaluado. En términos prácticos, esto significa que existe una dosis óptima específica de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ que permite lograr la máxima reducción de sólidos totales suspendidos en los lactosueros.

Figura 15

Modelo de regresión cuadrática entre la dosis de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ y los SST (mg/L)



Fuente: Elaboración propia (2025).

La figura 15 muestra que los sólidos totales en suspensión del lactosuero presentan un comportamiento cuadrático en función de la dosis de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, observándose que al aumentar la dosis desde 0,00 g hasta aproximadamente 0,08 g los valores disminuyen considerablemente desde niveles cercanos a 10 500 mg/L hasta valores próximos a 800 mg/L, mientras que al incrementar la dosis hasta 0,10 g se evidencia un ligero aumento, lo que sugiere la existencia de un punto mínimo dentro del rango evaluado. En términos prácticos, esta figura evidencia que la relación entre la dosis de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ y los sólidos totales en suspensión no es lineal, sino parabólica,

indicando que alrededor de 0,08 g se obtiene la mayor reducción de sólidos suspendidos en el lactosuero

4.4.2. Existe una dosis óptima específica de sulfato de aluminio que maximiza la reducción de Turbidez en los lactosueros.

Tabla 16

Resumen del modelo de regresión cuadrática para la reducción de la turbidez mediante el tratamiento con $Al_2(SO_4)_3$ en lactosuero generado en el distrito de Llalli, 2025

R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Desv. Error de estimación
,960	,922	,904	430,624

La variable independiente es Dosis ($Al_2(SO_4)_3$)(g).

Fuente: Elaboración propia (2025).

- a. Bondad de ajuste.** El R cuadrado de 0,922 indica que el modelo de regresión cuadrática es capaz de explicar aproximadamente el 92,2% de la variabilidad observada en la turbidez de los lactosueros en función de la dosis de $Al_2(SO_4)_3$, lo que evidencia un ajuste alto del modelo. El R cuadrado ajustado de 0,904 respalda que la capacidad explicativa del modelo sigue siendo elevada aun después de considerar el ajuste por número de términos.
- b. Coeficiente de correlación R.** El valor de $R = 0,960$ expresa que existe una relación muy alta entre la dosis de $Al_2(SO_4)_3$ y la turbidez en los lactosueros. En términos prácticos, este valor sugiere que los cambios en la dosis están fuertemente asociados con cambios en la respuesta observada.

Tabla 17

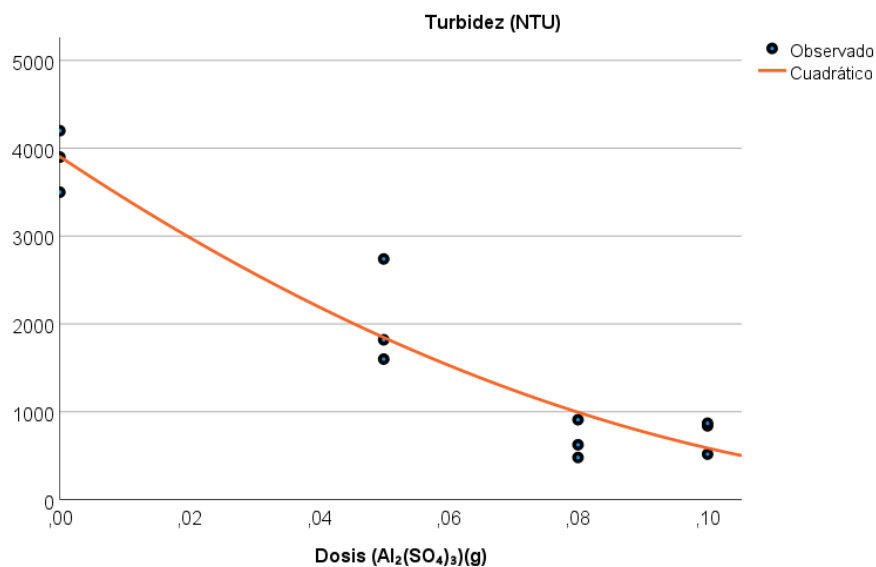
Coefficientes del modelo de regresión cuadrática de la dosis de $Al_2(SO_4)_3$ sobre la turbidez del lactosuero generado en el distrito de Llalli, 2025

	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.
	B	Desv. Error	Beta		
Dosis ($Al_2(SO_4)_3$)(g) ²	160029,4	116490,5	,457	1,374	,203
(Constante)	3905,5	247,5		15,777	,000

Fuente: Elaboración propia (2025).

Figura 16

Modelo de regresión cuadrática entre la dosis de $Al_2(SO_4)_3$ y la Turbidez (NTU)



Fuente: Elaboración propia (2025).

La figura 16 muestra que la turbidez del lactosuero presenta una tendencia descendente en función de la dosis de $Al_2(SO_4)_3$, observándose que al aumentar la dosis desde 0,00 g hasta aproximadamente 0,08 g los valores de turbidez disminuyen notablemente desde niveles cercanos a 4200 NTU hasta valores próximos a 500 NTU, mientras que al incrementar la dosis hasta 0,10 g la reducción continúa, aunque con menor intensidad. En términos prácticos, esta figura evidencia que la relación entre la dosis de $Al_2(SO_4)_3$ y la turbidez no es lineal, sino

curvilínea descendente, indicando que el $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ejerce un efecto favorable en la reducción de turbidez del lactosuero dentro del rango experimental evaluado.

4.4.3. Existe una dosis óptima específica de sulfato de aluminio que maximiza la reducción de Potencial de hidrógeno en los lactosueros.

Tabla 18

Resumen del modelo de regresión cuadrática para la variación del pH mediante el tratamiento con $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ en lactosuero generado en el distrito de Llalli, 2025

R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Desv. Error de estimación
0,908	0,825	0,786	0,425

La variable independiente es Dosis ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$)(g).

Fuente: Elaboración propia (2025).

a. Bondad de ajuste

El R cuadrado de 0,825 indica que el modelo de regresión cuadrática es capaz de explicar aproximadamente el 82,5% de la variabilidad observada en el pH de los lactosueros en función de la dosis de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$. Esto evidencia que el modelo presenta un buen nivel de ajuste y una capacidad explicativa alta.

b. Coeficiente de correlación R

El valor de R es 0,908, lo que expresa que existe una correlación alta entre la dosis de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ y el pH en los lactosueros. En términos estadísticos, este valor muestra una asociación fuerte entre la variable independiente y la variable respuesta

Tabla 19

Coeficientes del modelo de regresión cuadrática de la dosis de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ sobre el pH del lactosuero generado en el distrito de Llalli, 2025

	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados		t	Sig.
	B	Desv. Error	Beta			
Dosis ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$)(g) ²	-383,5	114,9	-1,660		-3,338	,009
(Constante)	5,2	,244			20,968	,000

Fuente: Elaboración propia (2025).

Para la variable dosis de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ (g)², el coeficiente B es -383,5, lo que indica que por cada incremento de una unidad en el cuadrado de la dosis de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, el pH estimado disminuye en 383,5 unidades, manteniendo constantes los demás factores. El valor de Sig. es 0,009, que es menor que 0,05, lo que indica que este efecto es estadísticamente significativo.

Constante: el coeficiente B es 5,2, que representa el valor esperado del pH cuando la dosis de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ es igual a 0 g. El valor de Sig. asociado a este coeficiente es 0,000, menor que 0,05, lo que indica que este coeficiente es estadísticamente significativo.

Según estos resultados, la ecuación de regresión queda de la siguiente manera:

$$Y = \beta_0 + \beta_2 X^2$$

Reemplazando los coeficientes:

$$Y = 5,2 - 383,5X^2$$

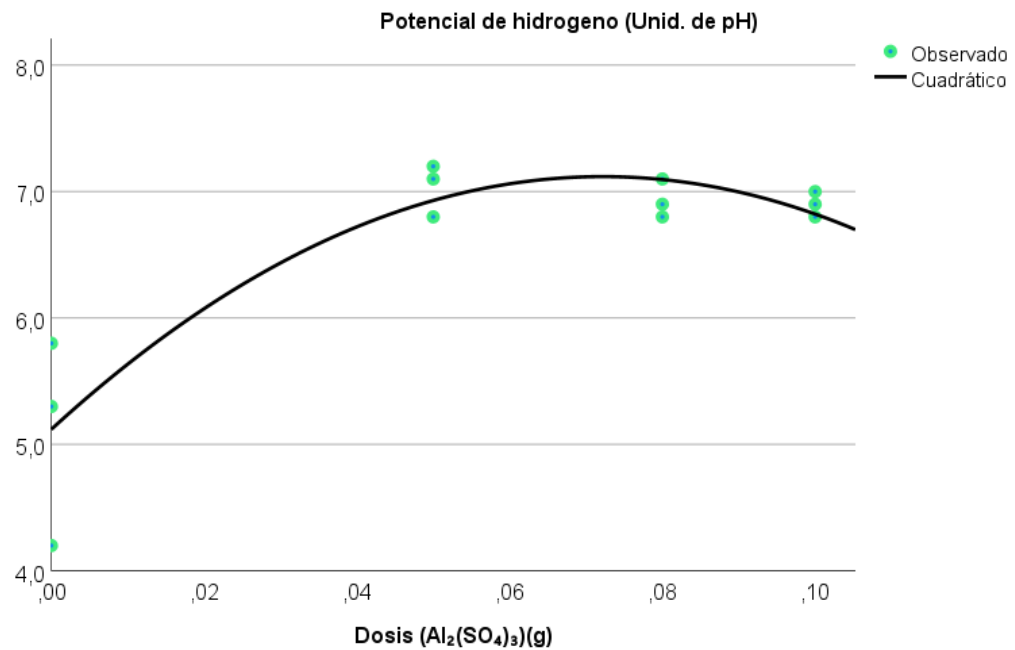
Por lo tanto, la ecuación del modelo de regresión cuadrática quedaría:

$$\text{Potencial de hidrógeno} = 5,2 - 383,5(\text{Dosis})^2$$

La interpretación de esta ecuación indica que la relación entre la dosis de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ y el pH presenta un comportamiento cuadrático descendente, debido a que el coeficiente del término cuadrático es negativo. Esto significa que, a medida que aumenta la dosis de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, el pH tiende a disminuir de forma no lineal, mostrando una curvatura hacia abajo. En términos prácticos, el modelo sugiere que la dosis de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ influye en la reducción del pH en los lactosueros

Figura 17

Modelo de regresión cuadrática entre la dosis de $Al_2(SO_4)_3$ y el pH



Fuente: Elaboración propia (2025).

La figura 17 muestra que el pH del lactosuero presenta una tendencia cuadrática en función de la dosis de $Al_2(SO_4)_3$, de modo que al incrementar la dosis desde 0,00 g hasta aproximadamente 0,05 g y 0,08 g el pH aumenta progresivamente desde valores cercanos a 5 hasta niveles próximos a 7, mientras que al llegar a 0,10 g se observa una ligera disminución, lo que sugiere la existencia de un punto máximo en el comportamiento de la curva dentro del rango evaluado. En términos prácticos, esta figura evidencia que la relación entre la dosis de $Al_2(SO_4)_3$ y el pH no es lineal, sino parabólica, indicando que alrededor de 0,08 g se alcanza el mayor efecto sobre el pH del lactosuero.

4.4.4. Existe una dosis óptima específica de sulfato de aluminio que maximiza la reducción de Demanda química de oxígeno en los lactosueros.

Tabla 20

Resumen del modelo de regresión cuadrática para la reducción de la DQO mediante el tratamiento con $Al_2(SO_4)_3$ en lactosuero generado en el distrito de Llalli, 2025

R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Desv. Error de estimación
0,923	0,852	0,820	880,110

La variable independiente es Dosis ($Al_2(SO_4)_3$)(g).

Fuente: Elaboración propia (2025).

a. Bondad de ajuste

El R cuadrado de 0,852 indica que el modelo de regresión cuadrática es capaz de explicar aproximadamente el 85,2% de la variabilidad observada en la demanda química de oxígeno de los lactosueros en función de la dosis de $Al_2(SO_4)_3$. Esto evidencia que el modelo presenta un buen ajuste y una alta capacidad explicativa.

a. Coeficiente de correlación R

El valor de R es 0,923, lo que expresa que existe una correlación alta entre la dosis de $Al_2(SO_4)_3$ y la demanda química de oxígeno en los lactosueros. En términos prácticos, este resultado sugiere una relación fuerte entre ambas variables dentro del rango experimental evaluado.

Tabla 21

Coeficientes del modelo de regresión cuadrática de la dosis de $Al_2(SO_4)_3$ sobre la DQO del lactosuero generado en el distrito de Llalli, 2025

	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados		
	B	Desv. Error	Beta	t	Sig.
Dosis ($Al_2(SO_4)_3$)(g) ²	762942,9	238083,5	1,463	3,205	,011
(Constante)	5922,8	505,9		11,707	,000

Fuente: Elaboración propia (2025).

Para la variable Dosis de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ (g)², el coeficiente B es 762942,9, lo que indica que por cada incremento de una unidad en el cuadrado de la dosis de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, la demanda química de oxígeno estimada aumenta en 762942,9 unidades, manteniendo constantes los demás factores. El valor de Sig. es 0,011, que es menor que 0,05, lo que indica que este efecto es estadísticamente significativo.

Constante: el coeficiente B es 5922,8, que representa el valor esperado de la demanda química de oxígeno cuando la dosis de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ es igual a 0 g. El valor de Sig. asociado a este coeficiente es 0,000, menor que 0,05, lo que indica que este coeficiente es estadísticamente significativo.

Según estos resultados, la ecuación de regresión queda de la siguiente manera:

$$Y = \beta_0 + \beta_2 X^2$$

Reemplazando los coeficientes:

$$Y = 5922,8 + 762942,9 X^2$$

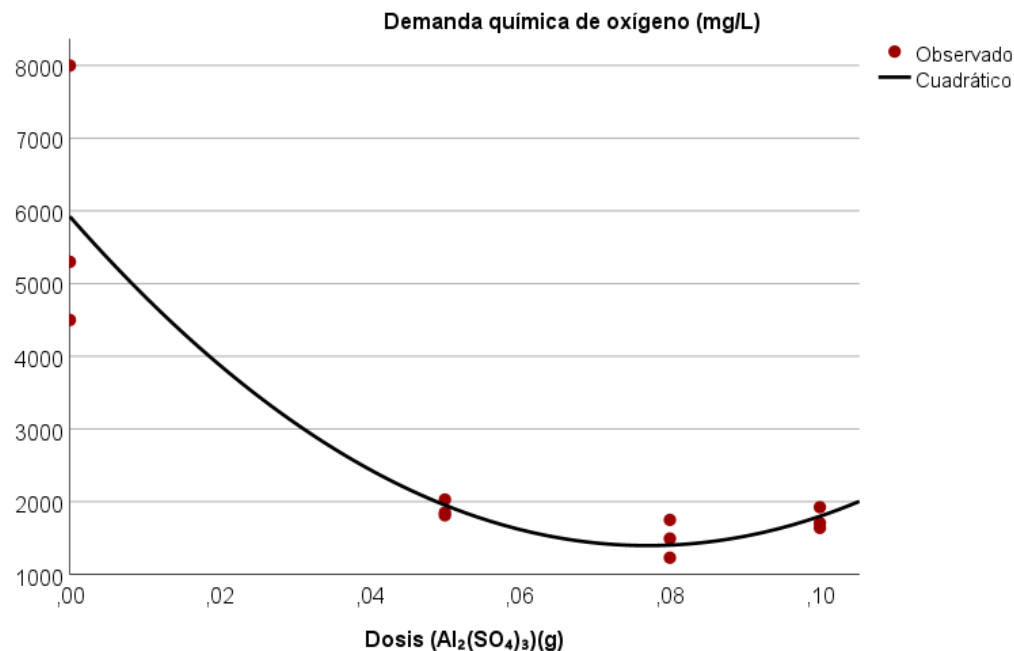
Por lo tanto, la ecuación del modelo de regresión cuadrática quedaría:

$$\text{Demanda química de oxígeno} = 5922,8 + 762942,9(\text{Dosis})^2$$

La interpretación de esta ecuación indica que la relación entre la dosis de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ y la demanda química de oxígeno presenta un comportamiento cuadrático. Como el coeficiente del término cuadrático es positivo, la curva tiene una forma parabólica abierta hacia arriba, lo que matemáticamente sugiere la presencia de un punto mínimo en la respuesta. En términos prácticos, esto permite sostener que la dosis de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ influye sobre la demanda química de oxígeno en los lactosueros

Figura 18

Modelo de regresión cuadrática entre la dosis de $Al_2(SO_4)_3$ y el DQO (mg/L)



Fuente: Elaboración propia (2025).

La figura 18 muestra que la demanda química de oxígeno del lactosuero presenta un comportamiento cuadrático en función de la dosis de $Al_2(SO_4)_3$, observándose que al aumentar la dosis desde 0,00 g hasta aproximadamente 0,08 g la DQO disminuye de manera marcada desde valores cercanos a 8000 mg/L hasta niveles próximos a 1500 mg/L, mientras que al incrementar la dosis hasta 0,10 g se aprecia un ligero aumento, lo que sugiere la existencia de un punto mínimo dentro del rango evaluado. En términos prácticos, esta figura evidencia que la relación entre la dosis de $Al_2(SO_4)_3$ y la demanda química de oxígeno no es lineal, sino parabólica, indicando que alrededor de 0,08 g se obtiene la mayor reducción de DQO en el lactosuero.

4.4.5. Existe una dosis óptima específica de sulfato de aluminio que maximiza la reducción de Demanda bioquímica de oxígeno en los lactosueros.

Tabla 22

Resumen del modelo de regresión cuadrática para la reducción de la DBO mediante el tratamiento con $Al_2(SO_4)_3$ en lactosuero generado en el distrito de Llalli, 2025

R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Desv. Error de estimación
0,929	0,863	0,833	530,177

La variable independiente es Dosis ($Al_2(SO_4)_3$)(g).

Fuente: Elaboración propia (2025).

a. Bondad de ajuste

El R cuadrado de 0,863 indica que el modelo de regresión cuadrática es capaz de explicar aproximadamente el 86,3% de la variabilidad observada en la demanda bioquímica de oxígeno de los lactosueros en función de la dosis de $Al_2(SO_4)_3$. Esto evidencia que el modelo presenta un buen ajuste y una alta capacidad explicativa.

b. Coeficiente de correlación R

El valor de R es 0,929, lo que expresa que existe una correlación alta entre la dosis de $Al_2(SO_4)_3$ y la demanda bioquímica de oxígeno en los lactosueros. En términos prácticos, este resultado muestra que la variación de la dosis está fuertemente asociada con la variación de la DBO dentro del rango evaluado.

Tabla 23

Coeficientes del modelo de regresión cuadrática de la dosis de $Al_2(SO_4)_3$ sobre la DBO del lactosuero generado en el distrito de Llalli, 2025

	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados		t	Sig.
	B	Desv. Error	Beta			
Dosis ($Al_2(SO_4)_3$)(g) ²	446586,1	143421,2	1,369		3,114	,012
(Constante)	3532,3	304,7			11,590	,000

Fuente: Elaboración propia (2025).

Para la variable Dosis de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ (g)², el coeficiente B es 446586,1, lo que indica que por cada incremento de una unidad en el cuadrado de la dosis de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, la demanda bioquímica de oxígeno estimada aumenta en 446586,1 unidades, manteniendo constantes los demás factores. El valor de Sig. es 0,012, que es menor que 0,05, lo que indica que este efecto es estadísticamente significativo.

Constante: el coeficiente B es 3532,3, que representa el valor esperado de la demanda bioquímica de oxígeno cuando la dosis de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ es igual a 0 g. El valor de Sig. asociado a este coeficiente es 0,000, menor que 0,05, lo que indica que este coeficiente es estadísticamente significativo.

Según estos resultados, la ecuación de regresión queda de la siguiente manera:

$$Y = \beta_0 + \beta_2 X^2$$

Reemplazando los coeficientes:

$$Y = 3532,3 + 446586,1 X^2$$

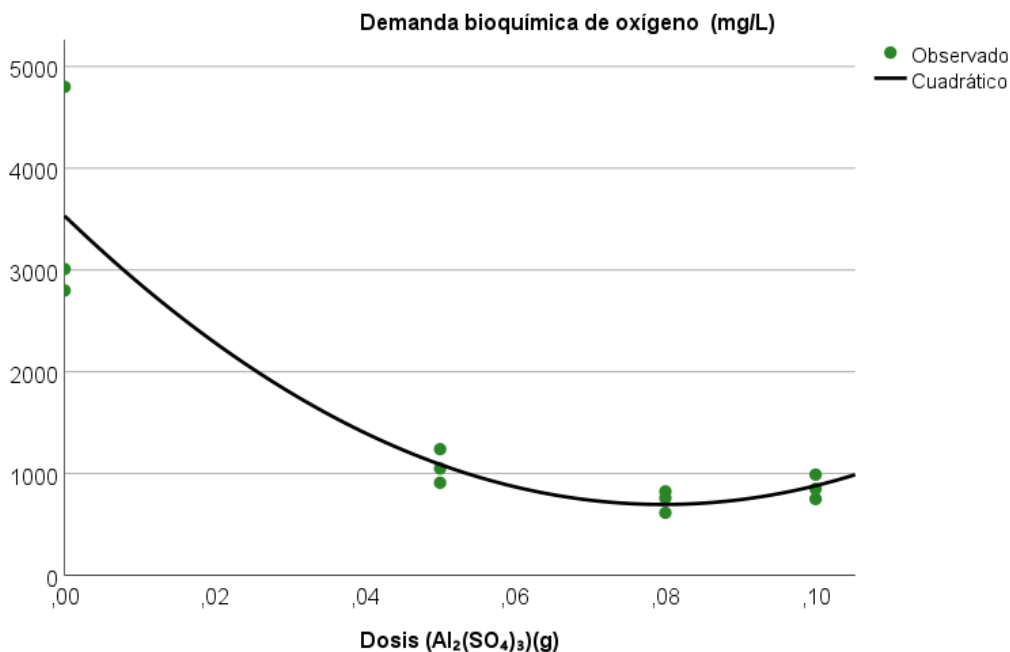
Por lo tanto, la ecuación del modelo de regresión cuadrática quedaría:

$$\text{Demanda bioquímica de oxígeno} = 3532,3 + 446586,1(\text{Dosis})^2$$

La interpretación de esta ecuación indica que la relación entre la dosis de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ y la demanda bioquímica de oxígeno presenta un comportamiento cuadrático. Debido a que el coeficiente del término cuadrático es positivo, la curva tiene forma parabólica abierta hacia arriba, lo que matemáticamente sugiere la presencia de un punto mínimo en la respuesta. En términos prácticos, esto permite afirmar que la dosis de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ influye sobre la DBO de los lactosueros.

Figura 19

Modelo de regresión cuadrática entre la dosis de $Al_2(SO_4)_3$ y el DBO (mg/L)



Fuente: Elaboración propia (2025).

La figura 19 muestra que la demanda bioquímica de oxígeno del lactosuero presenta un comportamiento cuadrático en función de la dosis de $Al_2(SO_4)_3$, observándose que al aumentar la dosis desde 0,00 g hasta aproximadamente 0,08 g la DBO disminuye considerablemente desde valores cercanos a 4800 mg/L hasta niveles próximos a 700 mg/L, mientras que al incrementar la dosis hasta 0,10 g se aprecia un ligero aumento, lo que sugiere la existencia de un punto mínimo dentro del rango evaluado. En términos prácticos, esta figura evidencia que la relación entre la dosis de $Al_2(SO_4)_3$ y la demanda bioquímica de oxígeno no es lineal, sino parabólica, indicando que alrededor de 0,08 g se obtiene la mayor reducción de DBO en el lactosuero.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- Los lactosueros generados en el distrito de Llalli presentan concentraciones elevadas de contaminantes, alcanzando valores de 10,520 mg/L de sólidos suspendidos totales, 4,200 NTU de turbidez, pH de 4.2, 8,000 mg/L de DQO y 4,800 mg/L de DBO, superando ampliamente los valores máximos admisibles. Esta condición evidencia su alto potencial contaminante y su impacto negativo sobre los cuerpos de agua, lo que implica la necesidad de implementar tratamientos adecuados para reducir la carga orgánica.
- Se determinó que la dosis óptima de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ (80 mg/L), en combinación con óxido de calcio, permitió alcanzar remociones de 93.5% en sólidos suspendidos totales, 87.1% en turbidez y 81.4% en DQO, lo que evidencia que la eficiencia del tratamiento depende de la optimización de la dosis aplicada. Estos resultados evidencian que la eficiencia del tratamiento depende de la optimización de la dosis aplicada.
- Los resultados evidencian que la dosis intermedia de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ (D2: 80 mg/L) fue la más eficiente, alcanzando remociones de 93.5% en SST, 87.1% en turbidez, 81.4% en DQO y 84.7% en DBO, en comparación con las dosis de 50 mg/L (D1) y 100 mg/L (D3). Este comportamiento confirma que el proceso de coagulación-floculación presenta una respuesta no lineal, donde dosis mayores no implican necesariamente mayor eficiencia, aportando un criterio técnico para la optimización del tratamiento y reduciendo el uso innecesario de coagulantes.

5.2. Recomendaciones

- Se recomienda explorar la eficacia de otros coagulantes y floculantes alternativos, como polímeros sintéticos o naturales, para comparar su rendimiento en la reducción de materia orgánica y la mejora de calidad del agua. Esta comparación permitiría identificar tratamientos más económicos o sostenibles para la industria láctea.
- Es recomendable evaluar la viabilidad económica del uso de CaO y $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ a gran escala en las industrias lácteas. Futuras investigaciones pueden centrarse en el análisis costo-beneficio de implementar estos tratamientos, en función de la cantidad de lactosueros generados y los beneficios ambientales derivados de la mejora en la calidad del agua.
- Una futura línea de investigación puede orientarse al análisis del impacto en la salud pública de los lactosueros tratados y cómo los residuos de coagulantes pueden afectar la calidad del agua potable en las regiones cercanas a las industrias lácteas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Afolalu, S. A., Ikumapayi, O. M., Ogedengbe, T. S., Kazeem, R. A., & Ogundipe, A. T. (2022). Waste pollution, wastewater and effluent treatment methods – An overview. *Materials Today: Proceedings*, 60, 3282-3288. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.231>
- Alsubih, M., El Morabet, R., Khan, R. A., Khan, N. A., Khan, A. R., Khan, S., Mubarak, N. M., Dehghani, M. H., & Singh, L. (2022). Field performance investigation for constructed wetland clubbed with tubesettler for hospital wastewater treatment. *Journal of Water Process Engineering*, 49, 103147. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.103147>
- Al-Tayawi, A. N., Sisay, E. J., Beszédes, S., & Kertész, S. (2023). Wastewater Treatment in the Dairy Industry from Classical Treatment to Promising Technologies: An Overview. *Processes*, 11(7), 2133. <https://doi.org/10.3390/pr11072133>
- American Public Health Association. (2017). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (23.^a ed.). American Public Health Association. https://openlibrary.org/books/OL32493189M/Standard_Methods_for_the_Examination_of_Water_and_Wastewater_23rd_Edition
- Badawi, A. K., Salama, R. S., & Mostafa, M. M. (2023). Natural-based coagulants/flocculants as sustainable market-valued products for industrial wastewater treatment: A review of recent developments. *RSC Advances*, 13(28), 19335-19355. <https://doi.org/10.1039/d3ra01999c>
- Bairagi, B., & Rastogi, D. (2015). Treatment of Dairy Wastewater by Physiochemical Method. *International Journal of Science and Research*, 6, 1-5. <https://doi.org/10.5772/intechopen.77110>

- Balladares, L. A. R. (2016). *Propuesta de un plan de manejo ambiental para la agro empresa “La Quesera” del Cantón Colta provincia de Chimborazo* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Chimborazo]. <http://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/1361>
- Bejarano-Toro, E., Sepúlveda-Valencia, J. U., & Rodríguez-Sandoval, E. (2022). Use of Ultrafiltration Technology to Concentrate Whey Proteins after White Cheese Manufacturing. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 75(2), 9860-9870. <https://doi.org/10.15446/rfnam.v75n2.98600>
- Betancur, B. A. W., & Molina, J. C. S. (2019). *Estudio de tratabilidad de las aguas residuales de una planta pulverizadora de leche* [Tesis de pregrado, Universidad de Antioquia]. https://www.lareferencia.info/vufind/Record/CO_9d987b6dd18a7aeae3fbe7a3ea63ae2f/Details
- Cedillo, E. G. C., & Flores, E. Z. (2023). Comparación de floculantes en el tratamiento de agua residual doméstica. *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, 11, 116-120. <https://doi.org/10.29057/icbi.v11iEspecial.10348>
- Chavez, A. Y., & Gomez, K. E. (2022). *Tratamiento de aguas residuales de industria láctea Floralp en la reserva de biosfera Oxapampa Ashaninka Yanesha—2021* [Tesis de pregrado, Universidad Continental]. <https://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/items/ef80f75f-4cd1-4b82-be47-2a0331c631d7>
- Choquehuanca, J. J. J. (2025). *Oxidación avanzada para la reducción de materia orgánica de lactosueros del Distrito de Llalli Provincia de Melgar 2024* [Tesis de pregrado, Universidad Néstor Cáceres Velásquez]. <https://repositorio.uancv.edu.pe/items/7066808b-fca1-407b-b6e6-937ab3378da9>

- Condori, L. (2025). *Evaluación de las características físico-químicas y rendimiento del queso fresco tipo Ricota elaborado con leche entera de vaca y lactosuero en Puno* [Tesis de maestría, Universidad Nacional del Altiplano de Puno].
<https://repositorio.unap.edu.pe/items/0d8ee015-95cd-4851-a24d-47354cc31b49>
- DIGESA. (2020). *Muestreo de efluentes y cuerpos receptores en el marco de la autorización sanitaria de vertimiento*. Ministerio de Salud.
https://www.digesa.minsa.gob.pe/pw_camisea/2006/informe_protocolo_monitoreo.pdf
- Elabdouni, A., Haboubi, K., Bensitel, N., Bouhout, S., Aberkani, K., & Youbi, M. S. E. (2022). Removal of organic matter and polyphenols in the olive oil mill wastewater by coagulation-flocculation using aluminum sulfate and lime. *Moroccan Journal of Chemistry*, 10, 125-138. <https://doi.org/10.48317/IMIST.PRSM/morjchem-v10i1.28852>
- Flores, K. A. R. (2023). *Aprovechamiento de efluentes de la industria láctea como solución nutritiva para sistemas hidropónicos en la microcuenca lechera de Ayaviri-Puno* [Tesis de pregrado, Universidad Católica de Santa María].
<https://repositorio.ucsm.edu.pe/items/2ff82016-0c39-434e-b59d-9ffb0a86b7d1>
- Gamarra, J. B. (2018). *Evaluación del impacto ambiental del lactosuero generado en la línea de producción de quesos de la planta de lácteos Huacariz alternativas de mitigación Cajamarca-Perú-2016* [Tesis doctoral, Universidad Nacional de Cajamarca].
<http://hdl.handle.net/20.500.14074/2126>
- Godoy, L. E. (2019). *Evaluación del impacto ambiental en la industria de derivados lácteos Tinajani EIRL 2019* [Tesis de pregrado, Universidad Continental].
<https://repositorio.continental.edu.pe/backend/api/core/bitstreams/2f82ffd1-4dac-4bad-8d8f-2c5162e37d41/content>

- Guijarro. (2024). *Elaboración del queso paso a paso*. Blog Quesos Guijarro.
<https://www.quesosguijarro.com/es/1-Blog/Elaboracion-del-queso-paso-a-paso.htm>
- Gupta, C., Pacheco, C., & Prakash, D. (2019). *Lactoserum: As a Complete Nutraceutical*. ResearchGate. <https://doi.org/10.4018/978-1-5225-3267-5.ch015>
- Guzmán, D. G. H. (2023). *Optimización del sulfato de aluminio para la reducción de la dco y dco en aguas residuales domesticas de la PTAR Maria Reich, Miraflores, 2022* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Federico Villarreal].
https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/RUNF_bd8769686a9c6e924f2568185cf04a54
- Hernández, M. (2025). *Utilización del lactosuero en la producción de acetato de isoamilo con kluyveromyces marxianus como estrategia de mitigación del impacto ambiental generado por la industria quesera* [Tesis de maestría, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo]. <http://dgsa.uaeh.edu.mx:8080/jspui/handle/231104/7382>
- Huaman, D. (2024). *Remoción de contaminantes fisicoquímicos en aguas residuales domésticas a nivel de laboratorio mediante un sistema de coagulación—Floculación y adsorción* [Tesis de pregrado, Universidad Continental].
<https://repositorio.continental.edu.pe/item/fb3c904d-e64b-40d6-ae0f-a42045f71339>
- Kaur, N. (2021). Different treatment techniques of dairy wastewater. *Groundwater for Sustainable Development*, 14, 100640. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2021.100640>
- Lama, F. (2022). *Aguas residuales agrícolas: Qué son y cómo utilizarlas para el riego*. Blog Lamastore. <https://www.lamastore.es/blog/aguas-residuales-para-riego-agricola/>

- LMI. (2018). *Coagulación y Floculación en el tratamiento de agua: Bombas dosificadoras y mezcladoras*. LMI Pumps. <https://www.lmipumps.com/es/applications/water-and-wastewater-treatment/coagulation-and-flocculation-in-water-treatment/>
- Mulyadi, D., Haryati, S., & Said, M. (2020a). The effect of calcium oxide and aluminum sulfate on iron, manganese and color removal at peat water treatment. *International Journal of Geomate*, 5(2), 42-48. <https://doi.org/10.24845/ijfac.v5.i2.42>
- Osorio-Rivera, M. A., Carrillo-Barahona, W. E., Negrete-Costales, J. H., Loo-Lalvay, X. A., & Riera-Guachichullca, E. J. (2021). La calidad de las aguas residuales domésticas. *Polo del Conocimiento: Revista Científico - Académica Multidisciplinaria*, 6(3), 228-245. <https://doi.org/10.23857/pc.v6i3.2360>
- Quille, L., Luque, O. M., & Aruhuanca, F. P. (2021). *Potencialidades del lactosuero generado por la industria quesera y su valorización*. 1(2), 16-24. <https://doi.org/10.51892/rcidas.v1i2.10>
- Quintero-Yepes, L., & Rodríguez-Valencia, N. (2020). Valuación de tres tipos de cal para el tratamiento primario de las aguas residuales del café. *Revista Cenicafé*, 71(2), 105-117. <https://doi.org/10.38141/10778/71208>
- Sonawane, A. V., & Murthy, Z. V. P. (2023). Dairy industry wastewater treatment by MOF and 2D nanomaterial engineered PVDF membranes based aerobic MBR: Membrane fouling mitigation and stability study. *Process Safety and Environmental Protection*, 171, 680-693. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.01.062>
- Tahraoui, H., Toumi, S., Boudoukhani, M., Touzout, N., Sid, A. N. E. H., Amrane, A., Belhadj, A. E., Hadjadj, M., Laichi, Y., Aboumustapha, M., Kebir, M., Bouguettoucha, A., Chebli, D., Assadi, A. A., & Zhang, J. (2024). Evaluating the effectiveness of coagulation-

- flocculation treatment using aluminum sulfate on a polluted surface water source: A year-long study. *Water*, 16(3), 400. <https://doi.org/10.3390/w16030400>
- Tayawi, A., Sisay, E. J., Beszédes, S., & Kertész, S. (2023). Wastewater Treatment in the Dairy Industry from Classical Treatment to Promising Technologies: An Overview. *Processes*, 11(7), Article 7. <https://doi.org/10.3390/pr11072133>
- Toapanta, A. D. (2019). *Propuesta de un sistema de tratamiento de aguas residuales en la industria láctea Pastolac* [Tesis de pregrado, Universidad Técnica de Cotopaxi]. <https://repoadmin.utc.edu.ec/items/483f9e4b-9d55-4bf7-82cc-423d763c0117>
- Tuset, S. (2020). *Tratamiento de aguas residuales de la industria láctea*. Condorchem Enviro Solutions. <https://condorchem.com/es/blog/tratamiento-de-aguas-residuales-de-la-industria-lactea/>
- Vielman, R. E. (2019). *Determinación del pH óptimo de coagulación mediante los coagulantes sulfato de aluminio y sulfato ferroso de las aguas residuales de una industria de alimentos* [Tesis de pregrado, Universidad de San Carlos de Guatemala]. <http://www.repositorio.usac.edu.gt/13788/>

ANEXOS

Anexo I. Descripción de variables dependientes e independientes

Tabla 24

Descripción de variables dependientes e independientes

Objetivo específico	Variables	Indicadores	Métodos
Determinar la concentración inicial de materia orgánica, turbidez y sólidos suspendidos totales de los lactosueros generados en el distrito de Llalli.	Dependiente: - Concentración de DBO y DQO (mg/L). - Turbidez (NTU). - Sólidos suspendidos totales (mg/L). - Muestreo de lactosueros in situ.	Concentración inicial de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) (mg/L), demanda Química de Oxígeno (DQO) (mg/L), Turbidez (NTU) y Sólidos Suspendidos Totales (SST) en mg/L	Medición de DQO, DBO, Turbidez y SST según APHA (2005).
Establecer la dosis óptima de óxido de calcio y sulfato de aluminio para la reducción de la materia orgánica en los lactosueros generados en el distrito de Llalli	Independiente: Dosis de coagulante. Dependiente: Concentración de DBO y DQO (mg/L) antes y después del tratamiento. Porcentaje de reducción para cada dosis. Dosis óptima (mg/L) que alcanza mayor eficiencia.	Niveles de DBO y DQO antes y después del tratamiento (mg/L) Porcentaje de reducción de DBO y DQO Dosis óptima (mg/L o %) que logra mayor eficiencia	Pruebas de Jarras
Comparar la eficacia del óxido de calcio y el sulfato de aluminio en la reducción de materia orgánica presente en los lactosueros generados en el distrito de Llalli.	Independiente: Tipo de coagulante. Dependiente: DBO y DQO (mg/L) después de cada tratamiento. Porcentaje de reducción por tipo de coagulante. Comparación estadística de eficacia.	DBO y DQO finales luego de aplicar cada coagulante y porcentaje de reducción. Diferencia estadística de eficacia entre ambos tratamientos	Aplicación de la dosis óptima de cada coagulante (determinada en O.E.2). Medición de DBO y DQO finales por cada tratamiento.

Fuente: Elaboración propia, 2025.

Anexo II. Panel fotográfico, de la toma muestras

Figura 20

Primer punto de toma de muestras



Fuente: Elaboración propia, 2025.

Figura 21

Segundo punto de toma de muestras



Fuente: Elaboración propia, 2025.

Figura 22

Tercer punto de toma de muestras



Fuente: Elaboración propia, 2025.

Anexo III. Aplicación de tratamientos y resultados

Figura 23

Inicio de tratamiento de los lactosueros antes de aplicar los coagulantes



Fuente: Elaboración propia, 2025.

Figura 24

Medición de parámetros iniciales



Figura 25

Lactosueros después de aplicar los coagulantes



Fuente: Elaboración propia, 2025.

Figura 26

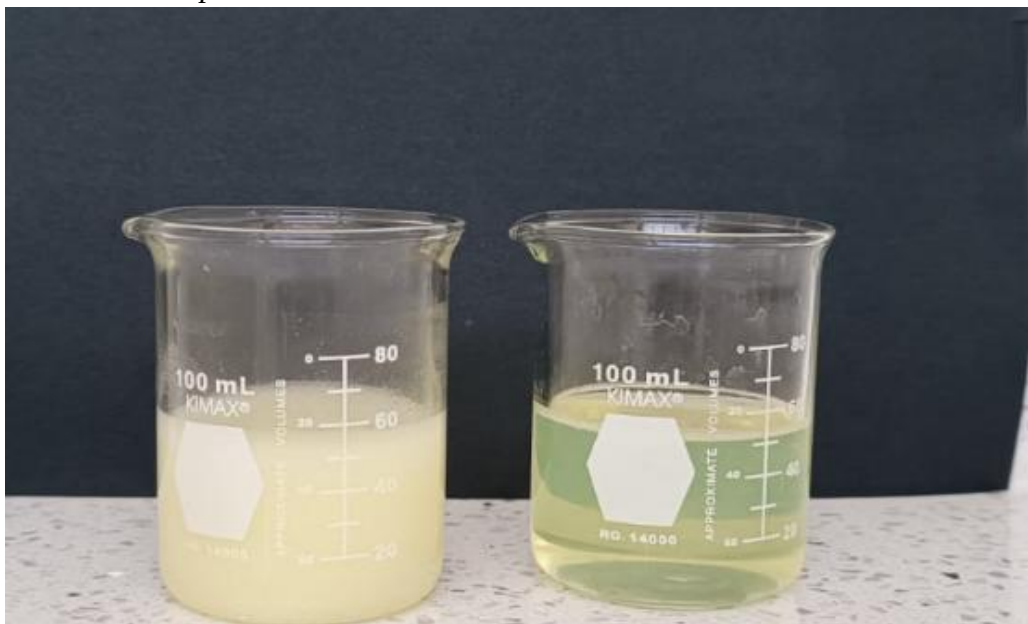
Observación antes de medir parámetros después de los tratamientos



Fuente: Elaboración propia, 2025.

Figura 27

Lactosuero después de los tratamientos



Fuente: Elaboración propia, 2025.

Figura 28

Observación del inicio de medición de los parámetros después de los tratamientos



Fuente: Elaboración propia, 2025.

Anexo IV. Informes de laboratorio

Figura 29

Informe de resultados de laboratorio N.º LQ-11525A



LAQUAMEQ E.I.R.L.

LABORATORIO DE ANÁLISIS QUÍMICO AMBIENTAL

INFORME DE RESULTADOS N.º: LQ - 11525A

DATOS DEL SERVICIO

SOLICITANTE : KELLEY YESICA VALENCIA TITO

PROYECTO : EFICACIA DEL ÓXIDO DE CALCIO Y SULFATO DE ALUMINIO EN LA REDUCCIÓN DE MATERIA ORGÁNICA EN LACTOSUEROS DE LLALLI, MELGAR

DATOS DEL ENSAYO

Producto : Agua residual
Numero de muestras : 03
Fecha de recepción : 26/09/2025
Fecha de análisis : 27/09/2025
Muestreado por : El cliente
Código, ubicación, fecha de muestreo:

Código	Distrito/Provincia/Departamento	Ubicación	Fecha y hora de muestreo
P - 01	Llalli/Melgar/Puno	E: 303671 N: 8348803	26/09/2025 10:10 a.m.
P - 02	Llalli/Melgar/Puno	E: 303386 N: 8348598	26/09/2025 10:30 a.m.
P - 03	Llalli/Melgar/Puno	E: 301546 N: 8347530	26/09/2025 11:30 a.m.

MÉTODO DE ENSAYO

Nº	PARÁMETROS	UNIDAD	METODOLOGÍA
1	Temperatura en laboratorio	°C	SM - 2550 B Método de laboratorio de campo
2	Turbidez	NTU	SM - 2130 Método nefelométrico
3	Sólidos totales en suspensión	mg/L	SM 2540 D - Sólidos suspendidos totales secados a 103-105 °C
4	Potencial de hidrogeno	Unid de pH	SM 4500 - H
5	Demanda química de oxígeno	mg/L	SM 5220 C Reflujo cerrado, método titulométrico
6	Demanda bioquímica de oxígeno	mg/L	SM 5210 B Prueba de DBO de 5 días



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

Fuente: Laboratorio LAQUAMEQ, 2025.

Figura 30

Informe de resultados de laboratorio N.º LQ-11525A



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

RESULTADOS

Nº	PARÁMETROS	UNIDAD	P - 01	P - 02	P - 03
1	Temperatura en laboratorio	°C	18.4	18.6	19.0
2	Turbidez	NTU	4200.0	3900.0	3500.0
3	Sólidos totales en suspensión	mg/L	10520.0	9325.0	8707.0
4	Potencial de hidrogeno	Unid de pH	4.2	5.3	5.8
5	Demanda química de oxígeno	mg/L	8000.0	4500.0	5300.0
6	Demanda bioquímica de oxígeno	mg/L	4800.0	3010.0	2800.0

OBSERVACIONES

Los resultados se aplican a la muestra tal como se recibió

Fecha de emisión
09 - 10 - 2025

LAQUAMEQ E.I.R.L.
LABORATORIO Y EQUIPOS

Ing. Neyma Chuquimamani Arapa
JEFE DE LABORATORIO
CIP: 287603

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

Fuente: Laboratorio LAQUAMEQ, 2025.

Figura 31

Informe de resultados de laboratorio N.º LQ-11525B



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

INFORME DE RESULTADOS N.º: LQ - 11525B

DATOS DEL SERVICIO

SOLICITANTE : KELLEY YESICA VALENCIA TITO
PROYECTO : EFICACIA DEL ÓXIDO DE CALCIO Y SULFATO DE ALUMINIO EN LA REDUCCIÓN DE MATERIA ORGÁNICA EN LACTOSUEROS DE LLALLI, MELGAR

DATOS DEL ENSAYO

Producto : Agua residual
Numero de muestras : 03
Fecha de recepción : 13/10/2025
Fecha de análisis : 14/10/2025
Muestreado por : El cliente
Código, ubicación, fecha de muestreo:

Código	Distrito/Provincia/Departamento	Ubicación	Fecha y hora de muestreo
T1D1	Juliaca/San Román/Puno	E: 378874.205 N: 8285728.687	13/10/2025 12:20 p.m.
T1D2	Juliaca/San Román/Puno	E: 378874.205 N: 8285728.687	13/10/2025 2:00 p.m.
T1D3	Juliaca/San Román/Puno	E: 378874.205 N: 8285728.687	13/10/2025 3:30 p.m.

MÉTODO DE ENSAYO

Nº	PARÁMETROS	UNIDAD	METODOLOGÍA
1	Temperatura en laboratorio	°C	SM - 2550 B Método de laboratorio de campo
2	Turbidez	NTU	SM - 2130 Método nefelométrico
3	Sólidos totales en suspensión	mg/L	SM 2540 D – Sólidos suspendidos totales secados a 103–105 °C
4	Potencial de hidrogeno	Unid de pH	SM 4500 - H
5	Demanda química de oxígeno	mg/L	SM 5220 C Reflujo cerrado, método titulométrico
6	Demanda bioquímica de oxígeno	mg/L	SM 5210 B Prueba de DBO de 5 días



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

Fuente: Laboratorio LAQUAMEQ, 2025.

Figura 32

Informe de resultados de laboratorio N.º LQ-11525B



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

RESULTADOS

Nº	PARÁMETROS	UNIDAD	T1D1	T1D2	T1D3
1	Temperatura en laboratorio	°C	16.5	17.3	16.9
2	Turbidez	NTU	1600.0	480.0	840.0
3	Sólidos totales en suspensión	mg/L	2200.0	625.0	953.0
4	Potencial de hidrogeno	Unid de pH	6.8	6.9	6.8
5	Demanda química de oxígeno	mg/L	1813.0	1493.0	1707.0
6	Demanda bioquímica de oxígeno	mg/L	1050.0	760.0	850.0

OBSERVACIONES

Los resultados se aplican a la muestra tal como se recibió

Fecha de emisión

30 – 10 – 2025

LAQUAMEQ E.I.R.L.
LABORATORIO Y EQUIPOS
Ing. Neyma Chuquimamani Arapa
JEFE DE LABORATORIO
CIP: 287663

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

Fuente: Laboratorio LAQUAMEQ, 2025.

Figura 33

Informe de resultados de laboratorio N.º LQ-11525C



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

INFORME DE RESULTADOS N.º: LQ - 11525C

DATOS DEL SERVICIO

SOLICITANTE : KELLEY YESICA VALENCIA TITO

PROYECTO : EFICACIA DEL ÓXIDO DE CALCIO Y SULFATO DE ALUMINIO EN LA REDUCCIÓN DE MATERIA ORGÁNICA EN LACTOSUEROS DE LLALLI, MELGAR

DATOS DEL ENSAYO

Producto : Agua residual
Numero de muestras : 03
Fecha de recepción : 14/10/2025
Fecha de análisis : 15/10/2025
Muestreado por : El cliente
Código, ubicación, fecha de muestreo:

Código	Distrito/Provincia/Departamento	Ubicación	Fecha y hora de muestreo
T2D1	Juliaca/San Román/Puno	E: 378874.205 N: 8285728.687	14/10/2025 11:00 a.m.
T2D2	Juliaca/San Román/Puno	E: 378874.205 N: 8285728.687	14/10/2025 12:20 p.m.
T2D3	Juliaca/San Román/Puno	E: 378874.205 N: 8285728.687	14/10/2025 2:40 p.m.

MÉTODO DE ENSAYO

Nº	PARÁMETROS	UNIDAD	METODOLOGÍA
1	Temperatura en laboratorio	°C	SM - 2550 B Método de laboratorio de campo
2	Turbidez	NTU	SM - 2130 Método nefelométrico
3	Sólidos totales en suspensión	mg/L	SM 2540 D – Sólidos suspendidos totales secados a 103–105 °C
4	Potencial de hidrogeno	Unid de pH	SM 4500 - H
5	Demanda química de oxígeno	mg/L	SM 5220 C Reflujo cerrado, método titulométrico
6	Demanda bioquímica de oxígeno	mg/L	SM 5210 B Prueba de DBO de 5 días



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

Fuente: Laboratorio LAQUAMEQ (2025).

Figura 34

Informe de resultados de laboratorio N.º LQ-11525C



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

RESULTADOS

Nº	PARÁMETROS	UNIDAD	T2D1	T2D2	T2D3
1	Temperatura en laboratorio	°C	16.1	16.8	16.4
2	Turbidez	NTU	1820.0	625.0	910.0
3	Sólidos totales en suspensión	mg/L	2740.0	830.0	1120.0
4	Potencial de hidrógeno	Unid de pH	7.1	6.8	7.0
5	Demanda química de oxígeno	mg/L	2030.0	1750.0	1925.0
6	Demanda bioquímica de oxígeno	mg/L	1240.0	825.0	990.0

OBSERVACIONES

Los resultados se aplican a la muestra tal como se recibió

Fecha de emisión
30 – 10 – 2025

LAQUAMEQ E.I.R.L.
LABORATORIO Y EQUIPOS

Ing. Neyma Chuquimamani Arapa
JEFE DE LABORATORIO
CIP: 287603

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

Fuente: Laboratorio LAQUAMEQ, 2025.

Figura 35

Informe de resultados de laboratorio N.º LQ-11525D



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

INFORME DE RESULTADOS N.º: LQ – 11525D

DATOS DEL SERVICIO

SOLICITANTE : KELLEY YESICA VALENCIA TITO
PROYECTO : EFICACIA DEL ÓXIDO DE CALCIO Y SULFATO DE ALUMINIO EN LA REDUCCIÓN DE MATERIA ORGÁNICA EN LACTOSUEROS DE LLALLI, MELGAR

DATOS DEL ENSAYO

Producto : Agua residual
Numero de muestras : 03
Fecha de recepción : 15/10/2025
Fecha de análisis : 16/10/2025
Muestreado por : El cliente
Código, ubicación, fecha de muestreo:

Código	Distrito/Provincia/Departamento	Ubicación	Fecha y hora de muestreo
T3D1	Juliaca/San Román/Puno	E: 378874.205 N: 8285728.687	15/10/2025 12:10 p.m.
T3D2	Juliaca/San Román/Puno	E: 378874.205 N: 8285728.687	15/10/2025 1:30 p.m.
T3D3	Juliaca/San Román/Puno	E: 378874.205 N: 8285728.687	15/10/2025 3:00 p.m.

MÉTODO DE ENSAYO

Nº	PARÁMETROS	UNIDAD	METODOLOGÍA
1	Temperatura en laboratorio	°C	SM - 2550 B Método de laboratorio de campo
2	Turbidez	NTU	SM - 2130 Método nefelométrico
3	Sólidos totales en suspensión	mg/L	SM 2540 D – Sólidos suspendidos totales secados a 103–105 °C
4	Potencial de hidrogeno	Unid de pH	SM 4500 - H
5	Demanda química de oxígeno	mg/L	SM 5220 C Reflujo cerrado, método titulométrico
6	Demanda bioquímica de oxígeno	mg/L	SM 5210 B Prueba de DBO de 5 días



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

Fuente: Laboratorio LAQUAMEQ, 2025.

Figura 36

Informe de resultados de laboratorio N.º LQ-11525D



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

RESULTADOS

Nº	PARÁMETROS	UNIDAD	T3D1	T3D2	T3D3
1	Temperatura en laboratorio	°C	15.9	16.3	16.9
2	Turbidez	NTU	1590.0	518.0	870.0
3	Sólidos totales en suspensión	mg/L	2240.0	610.0	950.0
4	Potencial de hidrogeno	Unid de pH	7.2	7.1	6.9
5	Demanda química de oxígeno	mg/L	1850.0	1230.0	1640.0
6	Demanda bioquímica de oxígeno	mg/L	910.0	615.0	750.0

OBSERVACIONES

Los resultados se aplican a la muestra tal como se recibió

Fecha de emisión

30 - 10 - 2025

LAQUAMEQ E.I.R.L.
LABORATORIO Y EQUIPOS

Ing. Neyma Chuquimamani Arapa
JEFE DE LABORATORIO
CIP: 287663

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

Fuente: Laboratorio LAQUAMEQ, 2025.