



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA
CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

**CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN DEL TRATAMIENTO FÍSICO-QUÍMICO DE
AGUAS RESIDUALES PROVENIENTES DE UNA INDUSTRIA LÁCTEA UBICADA EN
EL CANTÓN CAÑAR, PARA EL DISEÑO DE UNA LINEA DE TRATAMIENTO
BASADA EN PRUEBAS JAR TEST**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
título de Ingeniero Ambiental

AUTOR: WILSON VICENTE ENCALADA NEIRA

TUTORA: ING. PAOLA JACKELINE DUQUE SARANGO, Ph.D.

Cuenca - Ecuador

2026

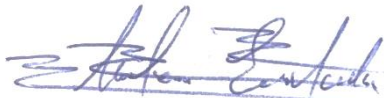
**CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN**

Yo, Wilson Vicente Encalada Neira con documento de identificación N° 0350251518 manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Cuenca, 5 de marzo del 2026

Atentamente,



Wilson Vicente Encalada Neira

0350251518

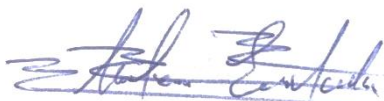
CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Yo, Wilson Vicente Encalada Neira con documento de identificación N° 0350251518, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del Trabajo experimental: “Caracterización y evaluación del tratamiento físico-químico de aguas residuales provenientes de una industria láctea ubicada en el cantón Cañar, para el diseño de una línea de tratamiento basada en pruebas Jar Test”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Ambiental, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 5 de marzo del 2026

Atentamente,



Wilson Vicente Encalada Neira

0350251518

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Paola Jackeline Duque Sarango con documento de identificación N° 1104257835, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN DEL TRATAMIENTO FÍSICO-QUÍMICO DE AGUAS RESIDUALES PROVENIENTES DE UNA INDUSTRIA LÁCTEA UBICADA EN EL CANTÓN CAÑAR, PARA EL DISEÑO DE UNA LINEA DE TRATAMIENTO BASADA EN PRUEBAS JAR TEST, realizado por Wilson Vicente Encalada Neira con documento de identificación N° 0350251518, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Trabajo experimental que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 5 de marzo del 2026

Atentamente,



Ing. Paola Jackeline Duque Sarango, Ph.D.

1104257835

DEDICATORIA

Dedico el presente trabajo a mis padres y hermanos, por su amor, sacrificio y apoyo incondicional, pilares fundamentales en mi formación personal y profesional.

A mi familia, por su constante motivación, comprensión y respaldo a lo largo de esta etapa académica.

Finalmente, a mis amigos Jonnathan y Daniel, cuya amistad, apoyo sincero y acompañamiento permanente fueron un valioso impulso para culminar con éxito este logro.

AGRADECIMIENTOS

Expreso mi profundo y sincero agradecimiento a la Ing. Paola Duque, PhD., por su acertada dirección, rigurosidad académica y constante acompañamiento durante el desarrollo de la presente investigación, cuyos valiosos aportes fueron determinantes para su consolidación. De igual manera, agradezco a los docentes que contribuyeron a mi formación profesional, por su dedicación, ética y compromiso con la excelencia académica, pilares fundamentales en mi crecimiento intelectual y técnico. Asimismo, expreso mi gratitud a Lácteos Fernández Cía. Ltda., por la confianza depositada y por las facilidades otorgadas para la ejecución de este estudio, permitiendo el desarrollo del trabajo investigativo en sus instalaciones.

RESUMEN

La investigación se centra en la caracterización físico-química de las aguas residuales generadas en una industria láctea del cantón Cañar y en la evaluación del tratamiento mediante ensayos de coagulación-floculación tipo Jar Test. Con base en los resultados obtenidos, se diseñó una línea de tratamiento físico-químico orientada a reducir la carga contaminante y garantizar el cumplimiento de la normativa ambiental vigente.

Palabras clave: aguas residuales, industria láctea, caracterización, coagulación-floculación, Jar Test, tratamiento físico-químico.

ABSTRACT

The research focuses on the physicochemical characterization of wastewater generated in a dairy industry of Cañar and on the evaluation of the treatment through coagulation-flocculation Jar Test assays. Based on the results obtained, a physicochemical treatment line was designed to reduce the pollutant load and ensure compliance with current environmental regulations.

Índice de Contenidos

RESUMEN.....	7
ABSTRACT	7
1. INTRODUCCIÓN	16
1.1. Delimitación de la Investigación.....	20
1.1.1. Delimitación Geográfica o Espacial.....	21
1.2. Planteamiento del Problema.....	21
1.3. Objetivos	22
1.3.1. Objetivo General	22
1.3.2. Objetivo Específicos	22
2. MARCO TEÓRICO	23
2.1. Agua	23
2.2. Aguas Residuales	24
2.3. Clasificación de las Aguas Residuales	24
2.3.1. Aguas Residuales Domésticas.....	24
2.3.2. Aguas Residuales Industriales.....	25
2.3.3. Aguas Residuales Agrícolas	25
2.4. Índice de biodegradabilidad en Aguas Residuales	25
2.5. Contaminantes de Referencia.....	26
2.5.1. Contaminantes de Referencia Químicos	27
2.5.2. Contaminantes de Referencia Físicos	31

2.5.3.	Efectos de los Contaminantes de las Aguas Residuales Industriales en Receptores de Agua Dulce	37
2.5.4.	Tratamiento de las Aguas Residuales	38
2.5.5.	Coagulantes y coadyuvantes empleados en coagulación–floculación	43
2.6.	Marco Conceptual	45
2.6.1.	Métodos Analíticos.....	45
2.6.2.	Separación de Fases	45
2.6.3.	Filtración	45
2.6.4.	Grasas	45
2.6.5.	Aceites	45
2.6.6.	Tensoactivos	46
2.6.7.	Trampa de Grasas y Aceites	46
2.7.	Estado del Arte	46
3.	MATERIALES Y MÉTODOS	49
3.1.	Enfoque metodológico de la investigación	49
3.2.	Área de estudio.....	49
3.3.	Población de estudio.....	50
3.4.	Población.....	50
3.5.	Muestra.....	50
3.5.1.	Operacionalización de Variables	50
3.6.	Técnicas e Instrumentos de Recolección y Procesamiento de Datos.....	51

3.7.	Caracterización del Efluente	52
3.7.1.	Parámetros de estudio.....	52
3.8.	Caracterización del Efluente	54
3.9.	Diseño de Infraestructura Hidráulica	55
3.9.1.	Determinación del Caudal.....	56
3.9.2.	Factor de Seguridad.....	56
3.10.	Ensayos de coagulación–floculación (Jar Test).....	57
3.11.	Metodología para el diseño del sistema de tratamiento	59
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	60
4.1.	Contextualización de las Actividades Operativas	60
4.2.	Análisis de la Caracterización del Agua Residual.....	61
4.3.	Comparación con el Marco Legal Ambiental Aplicable	62
4.4.	Índice de biodegradabilidad	64
4.5.	Evaluación de los Ensayos de Coagulación–Floculación (Jar Test)	64
4.6.	Tratamientos ensayados	64
4.7.	Variación del pH en los ensayos Jar Test	65
4.7.1.	Variación del pH en el ensayo experimental 1	65
4.7.2.	Variación del pH en el ensayo experimental 2	66
4.7.3.	Variación del pH en el ensayo experimental 3	67
4.8.	Variación de la turbidez en función del ensayo experimental	68
4.8.1.	Variación de la turbidez en función del ensayo experimental Jar Test 1.....	68

4.8.2.	Variación de la turbidez en función del ensayo experimental Jar Test 2.....	69
4.8.3.	Variación de la turbidez en función del ensayo experimental Jar Test 2.....	70
4.9.	Variación de la turbidez según tipo de tratamiento	71
4.9.1.	Variación de la turbidez según el tipo de tratamiento en el ensayo Jar test 1	71
4.9.2.	Variación de la turbidez según el tipo de tratamiento en el ensayo Jar test 2	73
4.9.3.	Variación de la turbidez según el tipo de tratamiento en el ensayo Jar test 3	74
4.9.4.	Análisis del Ensayo 1	76
4.9.5.	Análisis del Ensayo 2	77
4.9.6.	Análisis del Ensayo 3	78
4.10.	Diseño de la Infraestructura de Tratamiento	78
4.10.1.	Aforo y Caudal de Diseño	79
4.10.2.	Dimensionamiento del Canal de Entrada	79
4.10.3.	Resultados Diseño Caudal de Entrada	84
4.10.4.	Dimensionamiento del Desbaste (rejas).....	84
4.10.5.	Resultados Diseño del Desbaste.....	86
4.10.6.	Dimensionamiento para la Trampa de Grasas y Aceites	87
4.10.7.	Resultados Diseño de la Trampa de Grasas	90
4.10.8.	Diseño del sistema de coagulación-Floculación	91
4.10.9.	Diseño del sistema de coagulación.....	92
4.10.10.	Diseño del sistema de floculación	93
4.10.11.	Sistema de sedimentación (posterior)	94

4.10.12.	Producción estimada de lodos	94
4.10.13.	Esquema del sistema propuesto.....	95
4.10.14.	Cálculo de potencia de mezcladores	95
4.10.15.	Cálculo de potencia	96
4.10.16.	Dimensionamiento de diámetro y velocidad de paletas	99
4.10.17.	Resumen del dimensionamiento del diámetro y velocidad de paletas	103
4.10.18.	Dimensionamiento del Tanque de Sedimentación	104
4.10.19.	Cálculo del Diámetro del Tanque Sedimentador.....	105
4.10.20.	Resultados Diseño Tanque de Sedimentación.....	107
4.10.21.	Evaluación del sistema combinado del tratamiento	108
4.11.	Discusión.....	109
4.11.1.	Caracterización del agua residual.....	109
4.11.2.	Evaluación por Unidades de Tratamiento	110
4.11.3.	Análisis de eficiencia frente a contaminantes biológicos.....	111
4.11.4.	Análisis de Tratamiento Óptimo de los ensayos	111
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	113
5.1.	Conclusiones	113
5.2.	Recomendaciones.....	114
6.	BIBLIOGRAFÍA.....	116
7.	ANEXOS.....	126
7.1.	ANEXO TÉCNICO.....	126

7.2. Documentación fotográfica del levantamiento de información y toma de muestras en la planta enfriadora de leche.....	130
--	-----

Índice de Tablas

Tabla 1. Importancia y funciones de una planta enfriadora de leche.	19
Tabla 2 Matriz de operacionalización de variables	51
Tabla 3 Metodologías de ensayo de análisis de parámetros físicos y químicos	53
Tabla 4: Criterios de tratamiento de acuerdo con el índice de biodegradabilidad.....	55
Tabla 5. Resultados de la caracterización del agua residual “Lácteos Fernández Cía. Ltda” .	62
Tabla 6. Comparación de la caracterización con la normativa vigente	63
Tabla 7 Tratamientos utilizados en el estudio.....	65
Tabla 8 Resultados óptimos del ensayo de Jar test número 1.....	76
Tabla 9. Resultados óptimos del ensayo de Jar test número 2.....	77
Tabla 10. Resultados óptimos del ensayo de Jar test número 3.....	78
Tabla 11: Estimaciones de caudal mediante aforos volumétricos	79
Tabla 12: Resultados de caudal de agua residual	79
Tabla 13: Coeficiente de Manning para cálculo de canales.....	80
Tabla 14: Criterios de diseño para canales rectangulares.....	81
Tabla 15: Resultados del canal de entrada	84
Tabla 16: Criterios hidráulicos y geométricos de diseño. Tomado de (Metcalf & Eddy, 2014).	84
Tabla 17: Resultados del sistema de desbaste	86

Tabla 18: Criterios de diseño de trampas de grasas y aceites. Tomado y modificado de (Metcalf & Eddy, 2014).	87
Tabla 19: Resultados del sistema de trampa de grasas y aceites	90
Tabla 20. Parámetros de diseño del sistema de coagulación-Floculación	92
Tabla 21. Parámetros del sistema de floculación	93
Tabla 22. Resultados de la potencia requerida	98
Tabla 23. Resultados de diámetro y velocidad de paletas	103
Tabla 24: Criterios de diseño para el tanque de sedimentación.	104
Tabla 25: Resultados del sistema del tanque de sedimentación	107
Tabla 26: Eficiencia del sistema sedimentador	108
Tabla 27. Eficiencia proyectada del sistema combinado	109
Tabla 28: Especificaciones Mecánicas	126
Tabla 29: Especificaciones Operativas	126
Tabla 30: Especificaciones Eléctricas	127
Tabla 31: Condiciones de Operación	127
Tabla 32: Especificaciones Mecánicas	128
Tabla 33: Especificaciones Operativas	128
Tabla 34: Especificaciones Eléctricas	129
Tabla 35: Condiciones de Operación	129
Tabla 36: Opciones de Modelos Comerciales Sugeridos	130

Índice de figuras

<i>Figura 1 Ubicación geográfica de la empresa “Lácteos Fernández”</i>	21
<i>Figura 2. Punto de muestreo para toma de datos</i>	54
Figura 3 Diagrama de flujo de energía de la empresa “Lácteos Fernández Cía. Ltda.”	61
<i>Figura 4. Canal de descarga de las aguas residuales de la empresa láctea</i>	62
<i>Figura 5. Ensayos Jar Test realizados</i>	64
Figura 6. Variación del pH en el ensayo Jar Test número 1	66
Figura 7 Variación del pH en el ensayo Jar Test número 2	67
Figura 8 Variación del pH en el ensayo Jar Test número 3	68
Figura 9 Variación de la turbidez en función del ensayo experimental Jar Test número 1	69
Figura 10 Variación de la turbidez en función del ensayo experimental Jar Test número 2	70
Figura 11 Variación de la turbidez en función del ensayo experimental Jar Test número 2	71
Figura 12. Variación de la turbidez según tipo de tratamiento aplicado en el ensayo Jar Test 1	72
Figura 13 Variación de la turbidez según tipo de tratamiento aplicado en el ensayo Jar Test 2	73
Figura 14 Variación de la turbidez según tipo de tratamiento aplicado en el ensayo Jar Test 2	74
<i>Figura 15. Diseño del canal de entrada en el software hcanales V3</i>	80
<i>Figura 16. Diseño preliminar del canal de entrada</i>	83
Figura 17. Esquema del sistema de tratamiento planteado	95

1. INTRODUCCIÓN

La gestión del recurso hídrico en el marco del cumplimiento de la sanidad ambiental, se enfoca en el tratamiento de aguas residuales provenientes de diferentes sectores productivos. Según Zambrano y colaboradores (2022), el alcantarillado y el tratamiento de las aguas residuales son un problema que afecta a la sociedad, generando impactos negativos como la inhalación de olores procedentes de estos sistemas de depuración de aguas residuales, consecuentemente afligen a la salud de las personas que viven en los sectores aledaños y limitan el desarrollo de actividades productivas, educativas, culturales y desarrollo.

En la mayoría de los países latinoamericanos, los volúmenes de aguas residuales tratadas apropiadamente son sumamente bajos comparados con el total de aguas residuales generadas (Maya, 2019). En países en vías de desarrollo como el Ecuador, los proyectos que son presentados a los Gobiernos Autónomos Descentralizados carecen de tecnologías y automatización de estos procesos, en el Texto unificado de legislación ambiental TULSMA, se especifican los parámetros de descarga (bastante bajos en comparación con estándares europeos) para DBO, DQO, SST, nitrógeno total, fósforo entre otros parámetros. La mayoría de ciudades no cuenta con Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales, ni tampoco con alcantarillados separados para aguas servidas y aguas de lluvia, lo que dificulta aún más el tratamiento de agua (Torske, 2019).

Los procesos industriales en general generan grandes cantidades de agua residual con una alta concentración de contaminantes orgánicos. Ciertos casos se evidencian el vertido de sus aguas sin tratamiento previo, lo que ocasiona un desequilibrio del medio (Martínez et al., 2021).

Principalmente debido a que reducen la actividad fotosintética, inhiben el crecimiento de las especies acuáticas deseables; además, algunos de sus compuestos químicos generan un incremento de la turbiedad (Martínez et al., 2021; Torske, 2019).

La industria láctea ecuatoriana es un sector que tiene como materia prima la leche procedente de animales vacunos (Martínez et al., 2021). La leche es uno de los alimentos básicos de la humanidad. Los subproductos que genera esta industria se conocen como lácteos e incluyen una amplia gama que va desde los productos fermentados, como el yogurt y el queso, hasta los no fermentados: mantequilla, helados, entre otros (Cuvi, 2017).

Las aguas residuales de la industria láctea son el problema ambiental de mayor importancia en su operación, ya que producen grandes volúmenes de aguas residuales, con gran carga contaminante, proveniente de la limpieza de equipos y superficies, de aguas de refrigeración, de condensados, de restos de leche y lactosúero (Cuvi, 2017). La industria láctea que procesa leche líquida y productos con una vida útil corta, tales como yogures, cremas y quesos blandos, tiende a estar ubicada en la periferia de los centros urbanos cercanos a los mercados de consumo. Las plantas que elaboran elementos de vida útil más larga, como la mantequilla, la leche en polvo, queso y suero en polvo, tienden a estar situadas en zonas rurales cercanas a la producción de leche. La mayoría de las plantas de procesamiento de grandes volúmenes se suelen especializar en una gama limitada de productos (Torres, 2014).

En muchos países en desarrollo, la producción de derivados lácteos se realiza directamente en las granjas. (Cuvi, 2017; Torres, 2014). La industria láctea se dedica tanto al procesamiento de leche como a la obtención de sus diversos derivados, uno de los principales impactos ambientales asociados a esta actividad es la generación de aguas residuales en grandes volúmenes, caracterizadas por una alta carga orgánica. Estas provienen principalmente de

procesos de limpieza de equipos y áreas de trabajo, así como del uso de agua en sistemas de refrigeración, condensados, residuos de leche y subproductos como el lacto suero. (Cuvi, 2017)

A través de la contextualización del impacto ambiental específico al recurso hídrico motivado por las actividades de procesamiento de los productos lácteos a nivel industrial, la carga contaminante fluctúa en impactos severos y críticos (Duque-Sarango, P., & Hernández, 2020). Por otra parte, aquellas actividades que se optan como centros de acopio previo al transporte como producto crudo su impacto ambiental sobre el recurso hídrico genera una valoración moderada a severa. En el marco de desarrollo de este proyecto, la propuesta de diseño de infraestructura hidráulica para el tratamiento de aguas residuales provenientes de una planta enfriadora de leche se torna a un desarrollo práctico y eficiente.

La región austral andina del país, es núcleo productivo de leche con alta producción y una demanda formal considerable (MAG, 2024a). Se estima una demanda anual de 100 – 150 litros por habitante, similar al promedio nacional. Aunque la región está alineada con el resto del país, factores como informalidad elevada, reducción del consumo y competencia con alternativas impactan la verdadera demanda (CONALECHE, 2024).

La provincia del Cañar está implementando una estrategia integral (alimentación, sanidad, capacitación, calidad e institucionalidad lo cual ha favorecido un incremento considerable en la cantidad y calidad del producto lácteo, que ha resultado en un aumento significativo en los niveles de producción y calidad de leche, con ventajas tanto en fincas individuales como en centros comunitarios, más de 200 ganaderos observan un aumento promedio del 20% en su producción tras implementar forrajes mejorados y sanidad animal (MAG, 2024b).

La creciente demanda de productos lácteos en la zona sur del Ecuador en sinergia con el incremento de recursos por parte de la prefectura del Cañar, asume como una consecuencia el

incremento en industrias de procesamiento de lácteos. A partir de ello la oportunidad de establecimiento de industrias de acopio o enfriamiento de leche cruda.

En síntesis, una estación de recepción y enfriamiento de leche cruda es una instalación donde se recibe, analiza, enfría y almacena temporalmente la leche cruda producida por los ganaderos, antes de ser transportada a una planta procesadora o de industrialización.

En la siguiente tabla se presentan la importancia y las principales funciones que se llevan a cabo en la planta enfriadora de leche lácteos Fernández Cía. Ltda.

Tabla 1. Importancia y funciones de una planta enfriadora de leche.

Funciones principales	Importancia
Recepción de la leche cruda proveniente de diferentes productores.	Preserva la calidad e inocuidad de la leche.
Evaluación de calidad (control de temperatura, acidez, grasa, etc.).	Reduce la contaminación microbiana.
Enfriamiento rápido hasta 4 °C para conservar la calidad microbiológica.	Facilita la logística de recolección y procesamiento.
Almacenamiento temporal en tanques refrigerados	Promueve la formalización del sector lechero local.
Despacho o transporte hacia plantas de procesamiento (queserías, pasteurizadoras, etc.).	

Fuente: Elaboración propia

La empresa de estudio en efecto su función principal es la de almacenar leche cruda, por ende, los impactos ambientales referentes a la alteración de la calidad del recurso agua superficial y subterráneo asumen netamente a la generación de aguas residuales provenientes de las actividades de limpieza y depuración de las áreas de acopio de la leche.

La empresa Lácteos Fernández Cía. Ltda., ubicado en la comunidad de Coyoctor entre el límite cantonal de Cañar y El Tambo, se sitúa a unos 2900 – 3050 m.s.n.m., receipta leche cruda de

haciendas y pequeñas asociaciones ganaderas de toda la zona de Cañar y El Tambo. La empresa cuenta con infraestructura adecuada para cumplir estándares de control y calidad con el objetivo de brindar el servicio de acopio, almacenamiento y posterior despacho de acuerdo a la demanda de las zonas comerciales, tomando como prioridad la empresa cañareja Nutri Leche.

En cuanto al cumplimiento de la normativa ambiental vigente, la actividad de acopio de leche cruda contemplada en este proyecto está sujeta a las disposiciones establecidas por la Licencia Ambiental. Además, dispone de un Plan de Manejo Ambiental orientado específicamente a la fase operativa y de funcionamiento, con el objetivo de minimizar los impactos ambientales asociados a su ejecución.

A partir de ello existen medidas ambientales propuestas para que el proyecto maneje sus descargas de efluente industrial, especificando que el proyecto, obra o actividad debe incorporar un tratamiento previo al vertido a un cuerpo de agua dulce, a su vez cumpliendo con lo especificado en la normativa ambiental Texto Unificado de Legislación Secundaria Medio Ambiente, Acuerdo Ministerial 061 y Acuerdo Ministerio 097A.

Consecuentemente de este cumplimiento específico para la continuidad del normal funcionamiento de la actividad, nace la propuesta del desarrollo del presente proyecto de investigación. El objeto es generar una base de datos primarios a partir de las características físicas del efluente y desarrollar un diseño que se ajuste al modelo de tratamiento con el porcentaje de eficiencia más elevado.

1.1. Delimitación de la Investigación

El alcance del estudio considera tanto la dimensión espacial como la temporal, estableciendo una delimitación específica para cada una de ellas con el fin de definir con precisión el contexto y los límites de la investigación.

1.1.1. Delimitación Geográfica o Espacial

La delimitación del área de estudio abarca varias zonas rurales del cantón Cañar y El Tambo por las actividades ganaderas sujetas al acopio de la leche cruda. La empresa se encuentra en un área estratégica, ubicada en la Panamericana Norte, las asociaciones ganaderas y hacendados conducen por vías de primer orden para el ingreso del producto al centro de acopio.

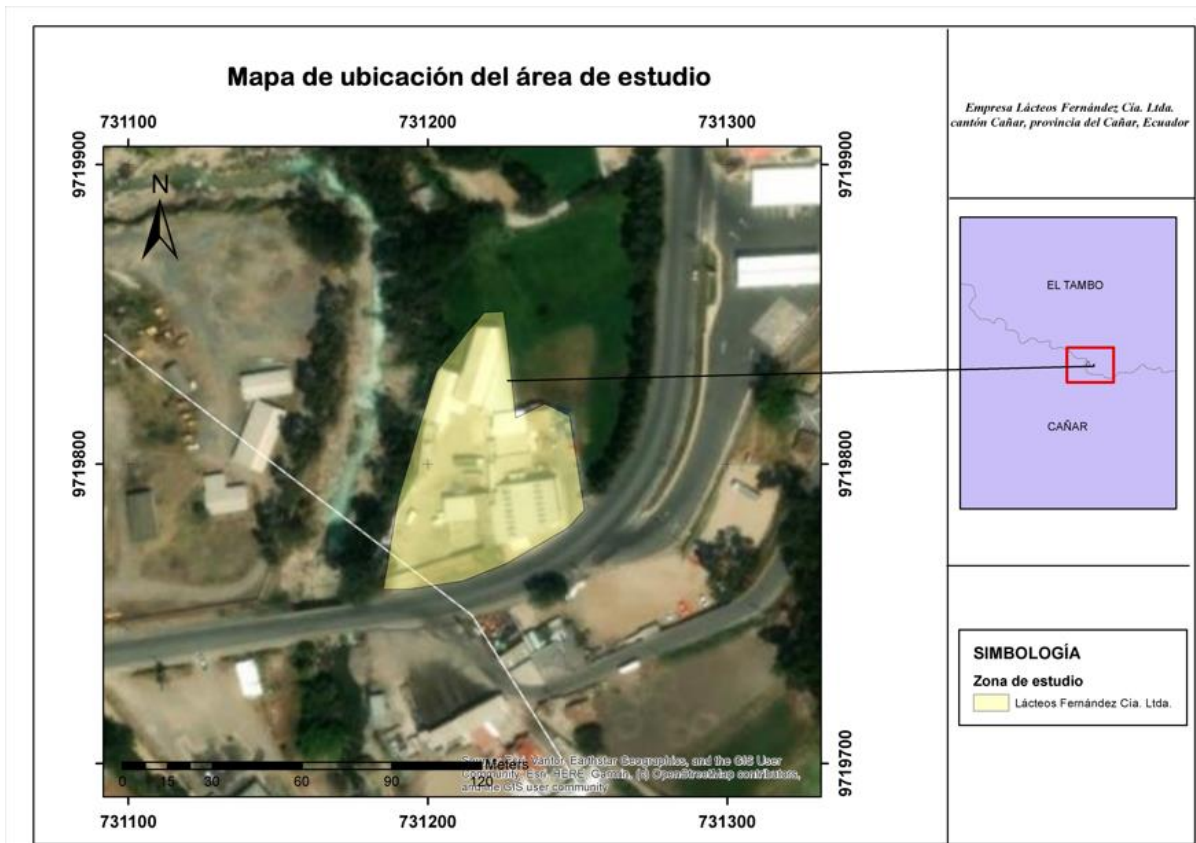


Figura 1 Ubicación geográfica de la empresa “Lácteos Fernández”

Fuente: Elaboración propia

1.2. Planteamiento del Problema

En base a la problemática ambiental asociada a la contaminación de cuerpos de agua por actividades vinculadas al acopio de leche cruda, se justifica la necesidad de esta investigación.

El estudio se orienta al diseño de una línea de tratamiento de aguas residuales generadas en la

industria láctea, con énfasis en el cumplimiento de los parámetros establecidos para el vertido en cuerpos de agua dulce.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Evaluar las características de las aguas residuales de una industria láctea y la eficiencia del tratamiento físico-químico mediante pruebas Jar Test, para definir los parámetros de diseño de una línea de tratamiento basada en dicho proceso.

1.3.2. Objetivo Específicos

- Caracterizar el agua residual de una industria de leche, ubicada en el cantón Cañar, y analizar la concentración de la carga contaminante, estableciendo diseños preliminares para la remoción de contaminantes derivados de la actividad y extrapolar a condiciones de diseño.
- Realizar ensayos de coagulación-floculación mediante Jar Test en matrices representativas del efluente, con el fin de evaluar la eficiencia del tratamiento físico-químico y obtener los parámetros operativos necesarios para el diseño de la línea de tratamiento.
- Diseñar una línea de tratamiento físico-químico para el efluente generado en una industria láctea del cantón Cañar, basada en los resultados obtenidos en las pruebas Jar Test.

2. MARCO TEÓRICO

A lo largo del tiempo la evolución y aplicación de soluciones tecnológicas dirigidas al manejo de aguas residuales generadas por actividades industriales han generado una data para formular diseños eficientes. Sin embargo, diseños específicos para industrias lácteas a partir de una caracterización de los efluentes no se han estandarizado.

Plantear diseños específicos a partir de las características de las aguas residuales de un centro de acopio de leche posiciona un tratamiento práctico y eficiente, consecuentemente el cumplimiento de la normativa ambiental vigente y responsabilidad extendida del generador (Duque-Sarango & Zagal-Andrade, 2023).

En los últimos años, ha crecido el interés por el tratamiento de aguas residuales industriales debido a su alta carga contaminante y su impacto significativo en el medio ambiente. Las actividades industriales, orientadas principalmente al beneficio económico, muchas veces descuidan su responsabilidad ambiental, lo que genera desequilibrios en los ecosistemas.

Sin generar contaminación no existe la posibilidad de generar economía. El lucro de las empresas juega un rol importante en el sesgo de la empatía por el medio ambiente, asumen un rol de productor y explotador de recursos, sin repercusión ambiental o enfoque en planes de acción para remediación de sitios contaminados o desequilibrados por compuestos externos a su naturaleza.

A continuación, se desarrolla la base teórica, basada en acentuar y potenciar los conceptos básicos en el desarrollo de la metodología, enfocada en el tratamiento de efluentes residuales provenientes de una industria láctea.

2.1. Agua

El agua constituye una matriz ambiental fundamental y es la sustancia más abundante del planeta. Es también la única que se encuentra de forma natural en los tres estados físicos:

líquido, sólido y gaseoso dentro de la atmósfera. La mayor parte del recurso hídrico se localiza en los océanos, que concentran aproximadamente el 97 % del total, en forma de agua salada que sustenta la biodiversidad marina. El 3 % restante corresponde al agua dulce, aunque una porción considerable permanece congelada en glaciares y casquetes polares. El acceso a este recurso vital depende de sistemas de abastecimiento que se alimentan de zonas de recarga hídrica y cuerpos de agua superficial, los cuales son esenciales para el suministro humano y ecosistémico. (Macías, 2021).

2.2. Aguas Residuales

La consecuencia del uso del recurso hídrico, como recurso para fabricación, producción y otros productos, generan las aguas residuales, se pueden definir como aquellas que, por uso del hombre, representan un peligro y deben ser desechadas, porque contienen gran cantidad de sustancias y/o microorganismos (Beltrán et al., 2021).

2.3. Clasificación de las Aguas Residuales

A partir del concepto de las aguas residuales, su generación y emisión a fuentes receptoras; aguas superficiales, destacan ciertos tipos, entre ellos; aguas residuales domésticas, aguas residuales industriales, aguas residuales agrícolas.

2.3.1. Aguas Residuales Domésticas

Las aguas residuales domésticas o grises, son aquellas que proceden de las heces y orina humanas, del aseo personal y de la cocina y de la limpieza de la casa. Suelen contener gran cantidad de materia orgánica y microorganismos, así como restos de jabones, detergentes, lejía y grasas. Generalmente presentan riesgos para el medio receptor sin un tratamiento previo a su descarga, sin embargo, en la mayoría de países su tratamiento está sujeto a cumplirse por decreto en la ley (Beltrán et al., 2021).

2.3.2. Aguas Residuales Industriales

En contraste, las aguas residuales industriales se originan principalmente en los procesos llevados a cabo dentro de fábricas o instalaciones productivas. Estas contienen una mezcla diversa de compuestos como aceites, detergentes, antibióticos, ácidos, grasas, así como otros residuos y subproductos de naturaleza mineral, química, vegetal o animal. Su composición varía ampliamente según el tipo de actividad industrial que las genera, lo que exige tratamientos específicos para su adecuada gestión (Contreras, 2020). Su carga contaminante es dependiente del tipo de actividad y fase del proyecto, para una estimación acertada y muestra característica se consideran intervalos de tiempo en la determinación de analitos de interés (Duque-Sarango & Pinos, 2022).

2.3.3. Aguas Residuales Agrícolas

Por último, las aguas residuales agrícolas se generan a partir de las actividades propias del sector agropecuario en zonas rurales. En muchos casos, estas aguas provienen del uso de aguas urbanas destinadas al riego, ya sea tratadas o no previamente, lo que implica riesgos potenciales para el suelo, los cultivos y los cuerpos hídricos receptores si no se gestionan adecuadamente. (Beltrán et al., 2021).

2.4. Índice de biodegradabilidad en Aguas Residuales

El índice de biodegradabilidad es un factor de influencia en la eficiencia de un tratamiento, debe ser mayor a 0,4 calculado con el factor DBO_5/DQO , lo cual no se cumple cuando las aguas residuales presentan contaminantes refractarios, que están relacionados con la mezcla de las aguas residuales domésticas y aguas residuales industriales sin tratamiento. Estos contaminantes se incrementan en las aguas residuales de zonas rurales por el aumento en el uso de productos químicos en los hogares, la industria doméstica u otras actividades productivas (Maya, 2019) (Duque-Sarango, Mera-Parra, et al., 2025; Romero-Martínez et al., 2019a).

Entre los contaminantes refractarios presentes en el agua residual doméstica están pesticidas, medicamentos, compuestos de aseo personal, residuos de industria doméstica, entre otros; y cuando sus concentraciones son muy altas, se reducen sus índices de biodegradabilidad hasta niveles en los que las eficiencias de las plantas de tratamiento convencionales no llegan a cumplir las normativas de descarga, convirtiéndose en infraestructura inservible (Beltrán et al., 2021; Proaño & Gualoto, 2018).

2.5. Contaminantes de Referencia

La descarga inadecuada de aguas residuales representa una amenaza cada vez más grave tanto para la salud humana como para los ecosistemas marinos, y se ha convertido en una de las principales fuentes de contaminación en las zonas costeras a nivel global (Wear & Vega, 2015). Según los reportes de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, Ciencia y Cultura UNESCO (2017), a escala global, se calcula que alrededor del 80 % de las aguas residuales, incluidas las de origen doméstico, son vertidas al ambiente sin ningún tipo de tratamiento previo. Esta práctica libera diversos contaminantes perjudiciales que afectan tanto a los ecosistemas marinos como a la salud humana, siendo especialmente dañinos para los arrecifes de coral. Estudios recientes evidencian que la contaminación por aguas residuales se concentra frecuentemente en zonas cercanas a estos ecosistemas, principalmente como consecuencia de una gestión deficiente o inexistente de los efluentes (Romero-Martínez et al., 2019b).

Diversos contaminantes considerados como parámetros clave para el control ambiental y las acciones de saneamiento se encuentran regulados dentro del marco normativo establecido en el Libro VI del Texto Unificado Legislación Secundaria del Medio Ambiente, TULSMA, se estipulan varios criterios de vertidos para aguas dulces o redes de alcantarillado, con el enfoque de la investigación, se determina parámetros físicos y químicos de interés relevante o referencia.

2.5.1. Contaminantes de Referencia Químicos

Hacen referencia a contaminantes que por su naturaleza se relacionan estrechamente a una composición de uno o varios elementos químicos de origen orgánico e inorgánico, en su mayoría al reaccionar con el agua, favorecen nuevos compuestos, fácilmente con propiedades altamente contaminantes, por efecto su incorporación en el efluente de descarga varía conforme a las propiedades y concentración (Duque, 2023).

Las variabilidades de las concentraciones de los contaminantes de referencia se tornan alteradas dependientemente del tipo de agua residual, generalmente las aguas residuales industriales presentan altas cargas de contaminantes, además de que sus tratamientos requieren sistemas convencionales.

El ambiente acuático puede verse afectado por una amplia variedad de compuestos orgánicos que contribuyen a su contaminación, y actualmente se dispone de múltiples métodos analíticos para su detección y monitoreo (Torres, 2014). Entre los compuestos orgánicos que destacan por su impacto ambiental se encuentran los hidrocarburos, en particular los hidrocarburos aromáticos policíclicos, algunos de los cuales han sido identificados como agentes cancerígenos. Así mismo, los fenoles representan un grupo de contaminantes relevantes, ya que generan alteraciones en el olor y el sabor del agua, especialmente cuando reaccionan con el cloro durante los procesos de desinfección (Beltrán et al., 2021) (Romero-Martínez et al., 2019c).

Otro grupo de sustancias relevantes desde el punto de vista ambiental lo constituyen los compuestos organometálicos, cuya presencia, incluso en concentraciones mínimas, puede generar efectos significativos en la cadena trófica. Estos compuestos tienden a bioacumularse, alcanzando niveles elevados en los organismos. Entre los más preocupantes se encuentran aquellos derivados del plomo, cadmio, estaño y mercurio (Ferrer et al., 2022).

2.5.1.1.Demanda Química de Oxígeno DQO

Este parámetro evalúa el contenido de materia orgánica presente en el agua, determinando la cantidad de oxígeno requerida para su oxidación mediante agentes químicos, como el permanganato o el dicromato de potasio. (Sosa et al., 2014).

Generalmente, este indicador muestra cifras más elevadas que las obtenidas por la DBO, dado que abarca una mayor cantidad de compuestos susceptibles de ser oxidados químicamente, en comparación con aquellos biodegradables. En el caso del análisis de aguas destinadas al consumo humano, la medición se realiza comúnmente utilizando permanganato, recibiendo el nombre de oxidabilidad. En cambio, para aguas residuales, se emplea dicromato como agente oxidante, denominándose propiamente demanda química de oxígeno (Vigueras, 2012).

2.5.1.2.Demanda Biológica de Oxígeno DBO

Corresponde a la cantidad de oxígeno requerida por los microorganismos para llevar a cabo la descomposición biológica de la materia orgánica contenida en el agua. Esta medición se realiza comúnmente a una temperatura de 20 °C durante un periodo de 5 o 3 días, y se expresa como DBO₅ o DBO, según el tiempo de ensayo utilizado (Tirado et al., 2016).

La determinación de la DBO₅ puede realizarse a través de la medición de la concentración de oxígeno disuelto utilizando el método manométrico, el cual se basa en el uso del respirómetro de Warburg. Durante el proceso de oxidación de la materia orgánica, se libera dióxido de carbono (CO₂), el cual es absorbido por una solución de hidróxido de sodio (NaOH) o hidróxido de litio (LiOH) ubicada en un recipiente dentro del tapón del frasco de ensayo. Esta absorción genera una disminución en la presión interna, la cual es registrada por un manómetro de mercurio, cuya escala está calibrada en miligramos por litro de oxígeno consumido (Zambrano et al., 2022).

Uno de los principales inconvenientes de la medición de la DBO₅ es la duración del ensayo, así como su incapacidad para distinguir entre la demanda de oxígeno de origen carbonado y la de origen nitrogenado. No obstante, su mayor fortaleza radica en que permite estimar la cantidad de materia orgánica biodegradable presente en el agua, lo cual es fundamental para el diseño y control de procesos de tratamiento biológico (& Ferrer Seco, 2010).

2.5.1.3.Demanda Biológica de Oxígeno a los 5 Días DBO5

La demanda bioquímica de oxígeno (DBO) es un parámetro utilizado para cuantificar el oxígeno requerido durante el proceso de descomposición biológica de la materia orgánica contenida en una muestra líquida. Esta medición se realiza a escala de laboratorio, generalmente durante un periodo de cinco días, como parte del análisis fisicoquímico de aguas residuales (Armijo et al., 2021).

2.5.1.4.Oxígeno Disuelto

El oxígeno disuelto constituye un indicador clave de la salud de los ecosistemas acuáticos, ya que es esencial para la supervivencia de los organismos aerobios. Un crecimiento descontrolado de biomasa en el medio acuático puede provocar una disminución significativa de este gas, comprometiendo el equilibrio del ecosistema. La disponibilidad de oxígeno también previene el desarrollo de procesos anaerobios, los cuales generan compuestos responsables de olores desagradables. Por tanto, su concentración se considera un parámetro determinante en la evaluación de la calidad del agua (Moreno et al., 2017; Moreta, 2008).

La concentración de oxígeno disuelto en el agua está influenciada por diversos factores físicos y químicos, entre los cuales se destacan la solubilidad del gas, presión parcial del gas en la atmósfera, temperatura, características del agua (salinidad, sólidos suspendidos, entre otros).

2.5.1.5. Grasas y Aceites

Las grasas y aceites son compuestos orgánicos formados esencialmente por ácidos grasos, los cuales pueden tener origen animal o vegetal. También se incluyen dentro de este grupo ciertos hidrocarburos derivados del petróleo. Según su estado físico y composición, estas sustancias se clasifican como grasas o aceites, y su diferenciación suele basarse en el tipo de fuente de la que provienen (Armijo et al., 2021).

Entre las grasas de origen animal se incluyen el sebo, obtenido del tejido adiposo de bovinos y ovinos, la grasa de cerdo y la manteca, entre otras. En cuanto a los aceites animales, destacan aquellos extraídos de especies marinas como sardinas, salmones, bacalao y tiburones, así como de mamíferos marinos como ballenas y delfines. Además, a partir de las extremidades de animales como vacunos, equinos y ovinos, se obtienen aceites utilizados comúnmente como agentes lubricantes o materiales impermeabilizantes (Beltrán et al., 2021).

Los aceites de origen vegetal constituyen el grupo más amplio y se pueden clasificar según su uso en dos categorías: alimenticios, como los extraídos de girasol, algodón, maní, soya, oliva, uva y maíz; y no alimenticios, como los obtenidos del lino, coco y tung. Estos compuestos se caracterizan por su baja densidad, escasa solubilidad en agua y limitada o nula biodegradabilidad. Debido a estas propiedades, si no se gestionan adecuadamente, tienden a acumularse en los cuerpos de agua formando capas superficiales que alteran la calidad del medio acuático (Armijo et al., 2021; Beltrán et al., 2021).

2.5.1.6. Potencial de Hidrógeno pH

El pH, asume un rol de variable dependiente del proceso, se resume netamente al tipo de agua residual, ligado a los procesos de producción y las metodologías de mantenimiento, operación y limpieza de maquinaria, equipos e insumos (Ferrer & Seco, 2010).

La actividad biológica en los ecosistemas acuáticos ocurre dentro de un rango de pH relativamente limitado. En general, valores comprendidos entre 5 y 9 no generan efectos adversos en la mayoría de las especies, aunque existen organismos particularmente sensibles a variaciones dentro de este intervalo. Un factor relevante asociado al pH es la agresividad de las aguas con características ácidas, ya que estas pueden inducir la disolución de sustancias mediante procesos de corrosión sobre los materiales expuestos (Carpio et al., 2021).

Un efluente con un pH fuera del rango óptimo puede afectar significativamente la estructura biológica de los ecosistemas acuáticos, alterando la composición de especies presentes. Además, este tipo de efluentes resulta más complejo de tratar mediante procesos biológicos, los cuales operan eficazmente en un intervalo de pH entre 6,5 y 8,5. Por lo general, las aguas residuales urbanas presentan un pH cercano a la neutralidad. Más allá del impacto directo, el pH también influye de forma indirecta en la toxicidad de ciertos compuestos, particularmente en aquellos cuya peligrosidad varía según su grado de disociación química (Beltrán et al., 2021; Carpio et al., 2021).

2.5.2. Contaminantes de Referencia Físicos

Los contaminantes físicos son compuestos de naturaleza cualitativa y cuantitativa, asumen un rol importante en la física del agua, generalmente sus cargas se representan visualmente con el color del agua residual. A su vez, las técnicas de análisis son más prácticas a nivel de laboratorio, asumen metodologías eficientes y de rápida cuantificación.

Los valores de concentración de contaminantes físicos se reducen a estimar la cantidad de sólidos totales, en efecto, se reduce en un tratamiento por filtros o biofiltros, a través del pretratamiento en la línea de depuración del agua residual.

2.5.2.1.Sólidos Totales

Los sólidos presentes en el agua comprenden tanto materiales disueltos como suspendidos, y su presencia puede afectar negativamente la calidad del recurso hídrico y su disponibilidad para distintos usos. Las aguas con alta mineralización resultan inapropiadas para ciertos procesos industriales y pueden ser poco aceptables desde el punto de vista estético para actividades recreativas, como el baño. La medición de sólidos es fundamental en la supervisión de tratamientos físicos y biológicos de aguas residuales, así como en la verificación del cumplimiento de los límites normativos de vertido. La concentración de sólidos suspendidos varía considerablemente entre cuerpos de agua y depende de factores como la geología del terreno, las condiciones climáticas, la cantidad de precipitaciones, las actividades humanas, y los aportes directos de contaminantes (Armijo et al., 2021; Tirado et al., 2016).

Los sólidos totales se definen como la fracción de materia que permanece como residuo después de someter una muestra de agua a un proceso de evaporación y secado a temperaturas entre 103 y 105 °C. Este valor comprende tanto los sólidos disueltos totales (aquellos que atraviesan un filtro) como los sólidos suspendidos totales (la porción retenida por el mismo). Durante el secado, los sólidos pueden retener aguas de cristalización o pequeñas cantidades de agua atrapada, y además se puede generar una pérdida de dióxido de carbono debido a la transformación de bicarbonatos en carbonatos. En general, la volatilización de materia orgánica es mínima, aunque en muestras con alto contenido de grasas y aceites, los resultados pueden ser poco precisos debido a las dificultades para lograr un peso constante en un tiempo aceptable. La medición de sólidos es fundamental para el control de procesos de tratamiento físico y biológico de aguas residuales, así como para verificar el cumplimiento de las normativas sobre vertidos (Suarez Beltrán, 2013).

2.5.2.2.Sólidos Suspendidos

Las aguas naturales no tratadas contienen principalmente tres tipos de sólidos no sedimentables: suspendidos, coloidales y disueltos. Los sólidos suspendidos se mantienen en movimiento debido a la capacidad de arrastre y soporte del flujo del agua. Aquellos con un tamaño inferior a 0,01 mm no se depositan fácilmente por gravedad y, por tanto, se clasifican como no sedimentables, mientras que las partículas de mayor tamaño (superiores a 0,01 mm) tienden a asentarse con mayor facilidad y se consideran sedimentables (Daviran, 2021).

Los sólidos coloidales están compuestos por partículas finas como limos, bacterias, virus y sustancias que generan color, las cuales no se sedimentan fácilmente, salvo tras largos periodos de reposo. Su presencia se manifiesta principalmente en el color y la turbidez de aguas que han sido decantadas sin la aplicación de procesos de coagulación. Por otro lado, los sólidos disueltos tanto orgánicos como inorgánicos son invisibles individualmente, no sedimentan de forma natural y pueden generar diversos problemas relacionados con el olor, el sabor, la coloración y la salubridad del agua. Para eliminarlos, es necesario recurrir a métodos físicos o químicos que permitan su precipitación y remoción efectiva (Daviran, 2021; Ferrer & Seco, 2010).

2.5.2.3.Sólidos Disueltos

Los sólidos disueltos totales (SDT) representan la concentración de minerales, metales, sales y compuestos orgánicos presentes en forma disuelta dentro de un volumen determinado de agua, expresándose generalmente en miligramos por litro (mg/L). Este parámetro está estrechamente vinculado con la calidad y el grado de pureza del agua, especialmente en los procesos de potabilización y tratamiento. Los SDT pueden encontrarse en distintas formas: molecular, iónica, coloidal o como partículas microgranulares en suspensión (Daviran, 2021).

Los niveles de sólidos disueltos totales afectan a todo lo que vive, bebe o usa agua. Por lo tanto, debe medirse para garantizar la calidad del agua potable y el rendimiento en entornos industriales que involucran tuberías, válvulas y otros equipos (Armijo et al., 2021).

2.5.2.4. Conductividad eléctrica

En los sistemas naturales, los sólidos suelen encontrarse en forma disuelta. Las sales presentes en el agua se disocian en iones con carga positiva o negativa. La conductividad eléctrica del agua se refiere a su capacidad para transportar corriente eléctrica a través de estos iones disueltos. Entre los principales cationes se encuentran el sodio (Na^+), calcio (Ca^{+2}), potasio (K^+) y magnesio (Mg^{+2}). Los iones más negativos son cloruro (Cl^-), sulfato (SO_4^{-2}), carbonato, bicarbonato. Aunque los nitratos y fosfatos tienen un rol biológico significativo, su influencia en la conductividad eléctrica es relativamente baja (Ferrer & Seco, 2010).

La salinidad representa la concentración total de sales disueltas en el agua y guarda una relación directa con la conductividad eléctrica, ya que ambas aumentan con la presencia de iones disueltos (Duque-Sarango et al., 2026). En los océanos, la sal predominante es el cloruro de sodio (NaCl); no obstante, en otros cuerpos de agua salina como el Lago Mono, los altos niveles de salinidad se deben a una mezcla de iones disueltos, entre los que destacan el sodio, cloruro, carbonato y sulfato (Enríquez & Vásquez, 2022).

2.5.2.5. Color

El color característico de un agua residual generalmente suele de gris a pardo oscura, sin embargo, su color es dependiente del tipo de actividad o de la industria, existen varios datos e incluso compuestos que pueden variar a grandes rasgos el color del agua residual (Deloya, 2006). Por otra parte, al aumentar el tiempo de transporte en las redes de alcantarillado y al desarrollarse condiciones más próximas a las anaerobias, el color del agua residual cambia gradualmente de gris a gris oscuro, para finalmente adquirir color negro.

2.5.2.6.Olor

Como un parámetro de caracterización cualitativa, se establece al olor de las aguas residuales como una mezcla de olores. Para algunos autores como Beltrán y colaboradores (2021), el olor de las aguas residuales tiene un olor parecido al de los huevos podridos o al agua estancada. Para ser más exactos, el olor de las aguas residuales huele a aguas residuales. Sin embargo, depende de su composición.

Es un olor característico y único, porque se produce de la mezcla del agua con los elementos de amplia variación en el medio de generación y en el medio receptor o de tratamiento. Es muy común percibir este olor tan característico cuando nos acercamos a una depuradora de aguas, y asumimos que es la propia depuradora la que genera ese olor. La transición del olor en una planta de tratamiento de aguas residuales es cualitativamente cuantificable o de interpretación amplia, por efectos de mezclado. Por ejemplo, el caso del agua de lluvia, no suele tener un olor apreciable. Es después, como producto de la mezcla con otras sustancias, cuando comienza a emitir olores (Vásquez Aranda et al., 2022)

2.5.2.7.Turbiedad

La turbiedad es un parámetro utilizado para evaluar la calidad del agua, ya que refleja su capacidad para transmitir la luz en presencia de partículas en suspensión, tanto coloidales como residuales. Esta medición se basa en comparar la cantidad de luz dispersada por una muestra con la dispersión registrada en una suspensión patrón, bajo condiciones controladas. Su valor proporciona información relevante sobre el nivel de sólidos no sedimentables presentes en aguas residuales o cuerpos hídricos naturales (Beltrán et al., 2021).

Las partículas coloidales presentes en el agua interfieren con la transmisión de luz al dispersarla o absorberla. Sin embargo, en aguas no tratadas no se puede establecer una correlación directa entre los niveles de turbiedad y la concentración de sólidos en suspensión. En contraste, en los

efluentes que provienen de procesos como la decantación secundaria dentro del sistema de lodos activados, sí existe una relación más consistente entre ambos parámetros

2.5.2.8. Temperatura

La temperatura de las aguas residuales suele ser superior a la del agua potable de entrada, principalmente debido al aporte de agua caliente proveniente de actividades domésticas e industriales, la temperatura media anual de las aguas residuales oscila entre 10 °C y 21 °C, siendo 15,6 °C un valor de referencia comúnmente aceptado.

Dado que el agua posee un calor específico significativamente mayor que el del aire, su temperatura se mantiene más elevada durante la mayor parte del año, excepto en los meses más cálidos del verano en ciertas regiones de Latinoamérica, donde puede observarse un comportamiento inverso. En estas zonas, la temperatura también puede fluctuar en función de los periodos de estiaje. Según la ubicación geográfica.

La temperatura del agua constituye un parámetro clave debido a su influencia sobre el equilibrio de los ecosistemas acuáticos, así como sobre la cinética de las reacciones químicas y la idoneidad del recurso hídrico para distintos usos. Un incremento térmico puede provocar alteraciones en la composición de las especies acuáticas, especialmente las ictiológicas. En el ámbito industrial, la temperatura del agua cobra especial relevancia en procesos que requieren refrigeración, donde se deben considerar las condiciones térmicas del agua captada. Además, la solubilidad del oxígeno disminuye a medida que aumenta la temperatura, lo que, junto al incremento de la velocidad de las reacciones químicas, puede conducir a una reducción crítica del oxígeno disuelto en cuerpos de agua superficiales, especialmente durante el verano. Este fenómeno se intensifica si se vierten volúmenes importantes de agua caliente en los sistemas acuáticos. Cambios térmicos abruptos también pueden provocar elevadas tasas de mortalidad

en la fauna acuática. Asimismo, temperaturas inusualmente altas favorecen la proliferación no deseada de macrófitas y hongos (Sánchez, 2014).

La actividad bacteriana en los procesos de tratamiento biológico del agua se desarrolla de forma óptima en un rango de temperatura que va de 25 °C a 35 °C. Sin embargo, temperaturas superiores a 50 °C inhiben tanto la digestión aerobia como los procesos de nitrificación. Cuando la temperatura desciende a aproximadamente 15 °C, las bacterias metanogénicas interrumpen su actividad, y las bacterias nitrificantes autótrofas dejan de operar en torno a los 5 °C. En condiciones extremas, cercanas a los 2 °C, incluso las bacterias quimioheterótrofas responsables de la degradación de materia orgánica carbonada cesan su acción biológica (Beltrán et al., 2021; Ferrer et al., 2022).

2.5.3. Efectos de los Contaminantes de las Aguas Residuales Industriales en Receptores de Agua Dulce

Tal como se ha abordado a lo largo de este capítulo, los componentes presentes en las aguas residuales cloacales pueden encontrarse en estado disuelto, suspendido o en forma coloidal, una condición intermedia entre los dos anteriores. Estas sustancias pueden tener origen mineral u orgánico. En el caso de los compuestos minerales, su presencia suele deberse a los minerales que originalmente estaban presentes en el agua de abastecimiento. Por otro lado, los compuestos orgánicos aportan características indeseables al efluente, especialmente cuando los microorganismos que habitan estas aguas consumen la materia orgánica muerta, iniciando procesos de descomposición que generan compuestos malolientes y deterioran las condiciones físicas del agua residual (Soto, 2019).

La descarga directa de aguas residuales sin tratamiento previo en cuerpos de agua superficiales como ríos, lagos o el mar genera impactos ambientales significativos que comprometen tanto la flora como la fauna acuática. Para minimizar estos efectos, es fundamental que los efluentes

reciban un tratamiento adecuado antes de su vertido, con el fin de modificar sus características físicas, químicas y microbiológicas. El nivel de tratamiento requerido dependerá de las condiciones específicas del cuerpo receptor, a fin de asegurar que la disposición final no provoque alteraciones negativas en el ecosistema (Ferrer et al., 2022).

Las plantas de tratamiento de aguas residuales deben ser concebidas, construidas y operadas con el propósito de transformar los líquidos cloacales, generados tras el uso de agua potable, en un efluente final que cumpla con los estándares de calidad ambiental. Asimismo, deben asegurar la correcta gestión y disposición de los sólidos contaminantes removidos durante el proceso. Para lograrlo, es imprescindible cumplir con normativas específicas que garanticen que el agua tratada mantenga una calidad tal que permita su posible reutilización sin representar un riesgo para el entorno ni para la salud pública (Ferrer et al., 2022; Soto, 2019).

A través, del periodismo ambiental independiente latinoamericano, la publicación realizada por MowbraySean (2022), destaca la creciente preocupación por los efectos ambientales de las aguas residuales sobre los ecosistemas acuáticos. Según el autor, un estudio reveló que estos efluentes contribuyen con aproximadamente 6,2 millones de toneladas de nitrógeno por año a las zonas costeras a nivel mundial, lo que favorece fenómenos como la eutrofización, la proliferación de algas nocivas y la formación de zonas muertas en los océanos. La investigación, que abarcó el análisis de 135 000 cuencas hidrográficas en todo el planeta, concluyó que tan solo 25 de ellas son responsables de casi el 50 % de la contaminación por nitrógeno derivada de residuos humanos, y estas se localizan tanto en países desarrollados como en desarrollo (MowbraySean, 2022).

2.5.4. Tratamiento de las Aguas Residuales

El tratamiento o depuración de aguas residuales comprende un conjunto de procesos de naturaleza física, química y biológica, cuyo objetivo principal es remover los contaminantes

presentes en el agua resultante de actividades humanas, sean estas domésticas, industriales o de otra índole (Ferrer & Seco, 2010).

La estrategia más común para mitigar la contaminación generada por aguas residuales consiste en someterlas a tratamiento en plantas especializadas, donde se eliminan la mayoría de los contaminantes. Posteriormente, el cuerpo de agua receptor completa el proceso mediante su capacidad natural de depuración (Asensi et al., 2019; Duque-Sarango, Cárdenas, et al., 2025; Duque-Sarango et al., 2023). El grado de tratamiento requerido depende de dicha capacidad de auto purificación, la cual está determinada principalmente por el caudal del cuerpo receptor, su contenido de oxígeno disuelto y su habilidad para renovarlo. En este contexto, el objetivo fundamental del tratamiento de aguas residuales es generar un efluente compatible con el entorno natural y un subproducto sólido (fango o lodo) que pueda ser dispuesto o reutilizado adecuadamente (Beltrán et al., 2021; Ferrer et al., 2022).

2.5.4.1. Pretratamiento

Se entiende por pretratamiento al conjunto de procesos aplicados al agua residual o efluente con el propósito de eliminar la mayor cantidad posible de sólidos o materiales que, por su tamaño o composición, podrían interferir en las etapas posteriores del tratamiento. Estas operaciones se basan exclusivamente en mecanismos físicos y, dependiendo de su finalidad, se emplean distintos sistemas específicos que se describen a continuación (Armijo et al., 2021).

Desbaste: El desbaste es una etapa del pretratamiento que tiene como finalidad la retención de sólidos de gran tamaño superiores a 1 mm tales como plásticos, fragmentos de madera y otros residuos voluminosos. Su propósito es proteger los equipos mecánicos como bombas, así como evitar obstrucciones en las tuberías y sistemas de válvulas. Para ello, el agua residual se hace pasar a través de rejillas o tamices. El diseño de estos dispositivos debe basarse en una

caracterización previa del efluente, de modo que se adecúe a las particularidades del tipo de agua residual a tratar (Ferrer et al., 2022).

Tamizado: El tamizado es un proceso destinado a retener partículas de menor tamaño, comprendidas generalmente entre 0,25 mm y 1 mm. Su objetivo principal es disminuir la carga contaminante del agua residual de manera eficiente y económica, contribuyendo además a la protección y buen funcionamiento de las etapas subsiguientes del tratamiento (Ferrer et al., 2022).

Desarenado: Este proceso tiene como finalidad remover del efluente las partículas minerales como arena, grava y otros sólidos inorgánicos en suspensión, con el propósito de prevenir su acumulación en las unidades posteriores y evitar una sobrecarga en la producción de lodos residuales (Ferrer et al., 2022; Ferrer & Seco, 2010).

Desengrase: Tal como sugiere su denominación, este proceso se encarga de eliminar las grasas y aceites presentes en el efluente, con el fin de evitar inconvenientes en los equipos y en las etapas subsiguientes del tratamiento, como ocurre en los decantadores o en los sistemas de lodos activados. La presencia excesiva de estos compuestos puede interferir en la eficiencia de la clarificación por sedimentación y aumentar de manera innecesaria la carga sobre las unidades posteriores (Ferrer et al., 2022).

Homogeneización: Esta operación se vuelve indispensable cuando se presentan variaciones significativas en el caudal o en la composición del efluente, lo cual requiere la implementación de un tanque de homogeneización. Este tipo de unidad permite alimentar de manera continua y estable a la planta de tratamiento, ofreciendo beneficios adicionales como la atenuación de picos de contaminación, una dosificación más eficiente de reactivos químicos y la reducción parcial de la carga contaminante antes del tratamiento principal (Ferrer et al., 2022).

2.5.4.2.Tratamiento Primario

Los tratamientos primarios de aguas residuales son aquellos que eliminan los sólidos en suspensión presentes en el agua. Los principales procesos físicos químicos que pueden ser incluidos en el tratamiento primario son los siguientes: sedimentación, flotación, coagulación – floculación y filtración (Ferrer et al., 2022).

Sedimentación: Es un proceso de separación por gravedad que hace que una partícula más densa que el agua tenga una trayectoria descendente, depositándose en el fondo del sedimentador. Está en función de la densidad del líquido, del tamaño, del peso específico y de la morfología de las partículas (Ferrer et al., 2022; Ferrer & Seco, 2010).

Flotación: proceso físico fundamentado en la diferencia de densidades. La flotación permite separar la materia sólida o líquida de menor densidad que la del fluido, por ascenso de ésta hasta la superficie del fluido, ya que, en este caso, las fuerzas que tiran hacia arriba (rozamiento y empuje del líquido) superan a la fuerza de la gravedad. Se generan pequeñas burbujas de gas (aire), que se asociarán a las partículas presentes en el agua y serán elevadas hasta la superficie, donde son arrastradas y sacadas del sistema (Ferrer et al., 2022; Ferrer & Seco, 2010).

Coagulación – Floculación: en muchos casos parte de la materia en suspensión está formada por partículas de muy pequeño tamaño, lo que conforma una suspensión coloidal. Estas suspensiones coloidales suelen ser muy estables, en muchas ocasiones debido a interacciones eléctricas entre las partículas. Por lo tanto, tienen una velocidad de sedimentación extremadamente lenta, por lo que haría inviable un tratamiento mecánico clásico (Beltrán et al., 2021).

Filtración: la filtración es una operación en la que se hace pasar el agua a través de un medio poroso, con el objetivo de retener la mayor cantidad posible de materia en suspensión. El medio

poroso tradicionalmente utilizado es un lecho de arena, de altura variable (Ferrer et al., 2022; Ferrer & Seco, 2010).

2.5.4.3. Tratamiento físico-químico aplicado a efluentes de la industria láctea

Los efluentes lácteos presentan altos contenidos de materia orgánica, grasas, proteínas y sólidos que dificultan la sedimentación natural. La coagulación y floculación permiten desestabilizar partículas coloidales mediante la adición de coagulantes (sulfato de aluminio, PAC, cloruro férrico) y floculantes poliméricos, favoreciendo la formación de agregados más densos y sedimentables.

Este tipo de tratamiento es especialmente eficiente para remociones de Sólidos suspendidos Totales, Turbidez, Aceites y Grasas, Demanda química de oxígeno y Demanda Biológica de oxígeno. Su eficiencia depende del pH, dosis de coagulante, gradiente de mezcla y tiempo de floculación. (Ferrer et al., 2022)

Las industrias lácteas consumen diariamente grandes cantidades de agua en sus procesos y, especialmente, para mantener las condiciones higiénicas y sanitarias requeridas. Dependiendo del tipo de instalación, el sistema de limpieza y utilización, la cantidad total de agua consumida en el proceso puede llegar a superar varias veces el volumen de leche tratada (Garzón et al., 2012; Martínez et al., 2021)

Este consumo suele encontrarse entre 1,3-3,2 l de agua/kg de leche recibida, pudiéndose alcanzar valores tan elevados como 10 l de agua/kg de leche recibida. Sin embargo, es posible optimizar este consumo hasta valores de 0,8-1,0 l de agua/kg leche recibida utilizando equipamientos avanzados y una operación adecuada. El mayor consumo de agua se produce en las operaciones auxiliares, particularmente en la limpieza y desinfección, donde se emplea entre el 25-40% del total (Camacho & Bryan, 2020; Sánchez, 2014).

2.5.5. Coagulantes y coadyuvantes empleados en coagulación–floculación

2.5.5.1. Policloruro de aluminio (PAC)

El policloruro de aluminio (PAC) es un coagulante inorgánico prehidrolizado formado por complejos polinucleares de aluminio parcialmente neutralizados. Su acción principal consiste en neutralizar las cargas negativas de las partículas coloidales y formar hidróxidos de aluminio que adsorben y atrapan impurezas presentes en el agua.

Entre sus principales ventajas se encuentran su eficiencia en un amplio rango de pH, menor consumo de alcalinidad y menor generación de lodos en comparación con coagulantes convencionales, además de presentar buen desempeño a bajas temperaturas (American Water Works Association (AWWA), 2011) (Bratby, 2016). En aguas residuales de la industria láctea, el PAC permite remover sólidos suspendidos, grasas y parte de la materia orgánica, mejorando significativamente la clarificación del efluente.

2.5.5.2. Sulfato de aluminio

El sulfato de aluminio, conocido como alumbre, es uno de los coagulantes más utilizados debido a su bajo costo y disponibilidad, su mecanismo de acción se basa en la formación de hidróxido de aluminio al reaccionar con el agua, el cual neutraliza cargas eléctricas y genera precipitados que atrapan sólidos suspendidos facilitando su sedimentación.

Sin embargo, su eficiencia depende del control adecuado del pH, generalmente entre 5.5 y 7.5, y puede producir mayor cantidad de lodos y consumo de alcalinidad, por lo que en algunos casos se requiere ajuste químico adicional (Bratby, 2016). A pesar de estas limitaciones, continúa siendo ampliamente utilizado en tratamientos primarios de aguas residuales industriales.

2.5.5.3. Polímero aniónico

Los polímeros aniónicos se emplean como coadyuvantes de coagulación para mejorar la formación y estabilidad de los flóculos. Estos compuestos poseen carga negativa y actúan formando puentes entre partículas previamente coaguladas, aumentando el tamaño y peso del floculo y favoreciendo su rápida sedimentación. Generalmente se adicionan después del coagulante principal, permitiendo mejorar la eficiencia de clarificación y reducir la turbidez residual del agua tratada (Spellman, 2017).

2.5.5.4. POLIDADMAC (polidimetildialilamonio cloruro)

El Polidadmac es un polímero catiónico soluble en agua utilizado como coagulante o coadyuvante en procesos de tratamiento de agua. Su acción consiste en neutralizar directamente las cargas negativas de las partículas coloidales, promoviendo su aglomeración y reduciendo turbidez y color.

Entre sus ventajas destacan su alta eficiencia a bajas dosis, rápida formación de flóculos y operación en un amplio rango de pH, además de generar menor cantidad de lodos que coagulantes tradicionales (American Water Works Association (AWWA), 2011) (Spellman, 2017). En efluentes industriales con presencia de grasas y proteínas, como ocurre en la industria láctea, este polímero contribuye a mejorar la eficiencia del tratamiento primario.

2.6. Marco Conceptual

2.6.1. Métodos Analíticos

Se trata de una metodología de investigación orientada a la separación, identificación y determinación de la composición relativa de una muestra de materia, mediante un análisis basado en la observación directa de un fenómeno específico (Salinas & Sarmiento, 2020).

2.6.2. Separación de Fases

Es una subdisciplina dentro de las operaciones unitarias que comprende un proceso físico utilizado para separar mezclas compuestas por sustancias que se encuentran en distintos estados de la materia (Riojas González et al., 2010).

2.6.3. Filtración

Se trata de una operación unitaria que permite la separación de fases entre un sólido y un líquido mediante un medio filtrante, el cual puede ser denominado tamiz, criba o cedazo, y puede estar compuesto por materiales de origen natural o sintético (Huamán, 2016).

2.6.4. Grasas

Las grasas en aguas residuales lácteas son compuestos lipídicos presentes en el agua residual generada durante los procesos de producción, limpieza y manipulación en la industria láctea. Estas grasas provienen principalmente de la leche cruda, la nata, los productos derivados (como quesos, mantequillas y yogures) y de los residuos de limpieza de equipos y superficies (Sosa et al., 2014).

2.6.5. Aceites

Los aceites en aguas residuales lácteas son compuestos lipídicos de origen animal presentes en los efluentes generados por las actividades de procesamiento de leche y productos lácteos. Estos aceites, junto con las grasas, forman parte del grupo denominado grasas y aceites, y están

compuestos principalmente por triglicéridos y ácidos grasos que derivan de la fase grasa de la leche (Maya, 2019).

2.6.6. Tensoactivos

Son compuestos químicos presentes en los efluentes generados por la industria láctea, principalmente como resultado del uso de detergentes, desinfectantes y agentes de limpieza utilizados en el lavado de equipos, tuberías, pisos y utensilios (Beltrán et al., 2021).

2.6.7. Trampa de Grasas y Aceites

Es un dispositivo hidráulico diseñado para interceptar, separar y retener grasas, aceites y sólidos suspendidos presentes en aguas residuales, mediante la reducción de la velocidad del flujo y el aprovechamiento de la diferencia de densidades entre los componentes. Su finalidad es evitar que estos contaminantes ingresen al sistema de alcantarillado o a unidades de tratamiento, previniendo obstrucciones, malos olores y fallas en los procesos de depuración posteriores.

2.7. Estado del Arte

En el contexto de una investigación orientada al tratamiento de aguas residuales generadas por una empresa láctea de alta capacidad productiva, de acuerdo con Valdiviezo (Valdiviezo, 2023), su proyecto tuvo como objetivo diseñar un sistema de tratamiento de aguas servidas para la Industria Lácteos del Valle, ya que sus efluentes eran descargados directamente en el río Quijos sin previo tratamiento. Para ello, se realizó una caracterización fisicoquímica y microbiológica mediante muestras compuestas, identificando parámetros como aceites y grasas, DQO, DBO, sólidos, nitrógeno y coliformes fecales que superaban los valores máximos permitidos por la normativa ambiental vigente. Considerando un índice de biodegradabilidad de 0,59, se seleccionó un tratamiento fisicoquímico que contempló aireación intermitente durante 48 horas, seguido de un proceso de coagulación con PAC a una dosis de 150 ppm, floculación con 6 ppm de reactivo, y una etapa de sedimentación de una hora. El sistema propuesto incluye una rejilla

manual, una trampa de grasas, un módulo de coagulación–floculación, un sedimentador y un filtro. La efectividad del diseño fue verificada mediante el cumplimiento de los estándares de calidad del agua tratada, según lo establecido por la normativa ambiental, recomendándose su aplicación como medida para mitigar el impacto sobre los cuerpos de agua de la zona

De la misma forma, un trabajo realizado por la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, en la carrera de Ingeniería Ambiental, menciona Toapanta (2024), en su investigación La empresa Lácteos Finos no dispone de un sistema de tratamiento para sus aguas residuales, las cuales son vertidas directamente al río Cutuchi, generando impactos negativos en el ambiente. Por ello, el objetivo del estudio fue diseñar una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR), basada en el análisis fisicoquímico del efluente. Se empleó un enfoque metodológico de tipo cuantitativo, realizando la recolección de muestras en campo y analizando parámetros como aceites, grasas, DBO₅, DQO, pH y temperatura en diferentes franjas horarias. Los resultados indicaron que seis de los parámetros analizados superaban los valores máximos establecidos por el Acuerdo Ministerial 097-A. El sistema diseñado incluye un pretratamiento compuesto por un conjunto de rejillas, seguido de una trampa para aceites y grasas; además, incorpora un tratamiento primario basado en procesos de floculación y coagulación y sedimentación, finalizando con un vertedero para la descarga del agua ya tratada. A través de simulaciones de tratamiento realizadas en laboratorio, se logró disminuir significativamente la carga contaminante. Como resultado, se propuso una línea de tratamiento de aguas residuales adaptada a las condiciones específicas de la empresa, garantizando el cumplimiento de la normativa ambiental vigente y permitiendo tanto la reutilización como la descarga segura del efluente en cuerpos hídricos naturales.

De acuerdo con Chariguaman y colaboradores (Chariguaman Coello et al., 2024), su investigación tuvo como propósito caracterizar y diseñar un sistema de tratamiento de aguas residuales para una planta procesadora de lácteos ubicada en la parroquia Fátima, provincia de

Pastaza. La planta genera grandes volúmenes de aguas residuales que se descargan sin tratamiento, afectando negativamente a cuerpos de agua dulce cercanos. Tras medir un caudal promedio de 2,052 m³/h y realizar una muestra compuesta durante ocho horas, se identificó que parámetros como DBO, DQO, aceites y grasas, nitrógeno total, y sólidos suspendidos y totales superaban los límites establecidos por la normativa ambiental ecuatoriana. En respuesta, se propuso un sistema de tratamiento que incluye una trampa de grasas, filtración lenta con grava y arena, y procesos de coagulación-floculación, utilizando PAC como coagulante óptimo. Las pruebas demostraron que este sistema reduce eficazmente la carga contaminante, cumpliendo con los límites del Anexo 1, Tabla 9 del Acuerdo Ministerial 097-A del TULSMA.

El análisis teórico realizado confirmó que la propuesta presentada se ajusta a los parámetros establecidos por la normativa nacional aplicable a efluentes industriales.

La presente investigación enmarcada, ejemplifica el desarrollo de tecnología en el marco de aplicación de tratamientos de efluentes residuales a través de recursos orgánicos, con costos relativamente económicos y una aplicación amplia. La mayoría de tratamientos conforme al estado del arte marcan un enfoque central destinado a empresas de procesamiento de lácteos, sin embargo, a diferencia de lo reportado en la literatura, se plantea llevar a cabo el análisis en concordancia con los objetivos específicos del tratamiento de aguas residuales generadas en una planta enfriadora de leche o centro de acopio

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Enfoque metodológico de la investigación

La presente investigación tiene un enfoque cuantitativo, de tipo aplicado, ya que se orienta al diseño de una línea de tratamiento físico-químico para aguas residuales industriales del sector lácteo, a partir de datos obtenidos mediante análisis de laboratorio y ensayos experimentales tipo Jar Test.

El nivel de investigación es descriptivo, debido a que se caracteriza y analiza la composición fisicoquímica del efluente generado por la empresa “Lácteos Fernández Cía. Ltda.”, sin manipular deliberadamente las variables del entorno. Adicionalmente, incorpora un componente experimental, asociado a la realización de pruebas de coagulación-floculación mediante Jar Test.

En cuanto al diseño, el estudio es no experimental, fundamentado en una estrategia documental y de campo:

Diseño Documental: Se basó en la recopilación, análisis e interpretación de fuentes secundarias, tales como normativas ambientales, literatura técnica sobre lácteos y estudios previos que permitieron sustentar el marco teórico y legal.

Diseño de Campo: Consistió en la recolección de datos directamente de la realidad en las instalaciones de la empresa. Bajo este enfoque, las variables se observaron en su estado natural sin manipulación deliberada por parte de los investigadores, garantizando la objetividad de los parámetros físicos y químicos obtenidos de las muestras de agua.

3.2. Área de estudio

El estudio se desarrolló en las instalaciones de la empresa Lácteos Fernández Cía. Ltda., ubicada en la comunidad de Coyector, entre los cantones Cañar y El Tambo. La empresa se dedica al acopio y enfriamiento de leche cruda, actividad que genera aguas residuales

principalmente durante los procesos de limpieza de silos, equipos e instalaciones. Dicho efluente se descarga al río Cañar sin un tratamiento previo causando un impacto ambiental severo al ecosistema de este cuerpo receptor y toda actividad que depende del mismo.

3.3. Población de estudio

3.4. Población

La población de esta investigación está constituida por el caudal total de aguas residuales industriales generadas por la empresa “Lácteos Fernández Cía. Ltda.”, específicamente aquellas derivadas de los procesos de acopio, enfriamiento y, fundamentalmente, de las actividades de limpieza y mantenimiento de los equipos de producción.

3.5. Muestra

La muestra es de tipo probabilístico, seleccionada mediante un muestreo aleatorio compuesto. Consiste en volúmenes representativos de agua residual recolectados durante la jornada laboral, considerando las distintas fases operativas del proceso.

Para garantizar la representatividad, la recolección se estructuró bajo los siguientes criterios:

Segmentación temporal: Se establecieron horarios específicos de muestreo para capturar la variabilidad de la carga orgánica tanto en la fase de procesamiento como en la fase crítica de limpieza y mantenimiento.

Uniformidad: Las muestras fueron tomadas al término de la jornada diaria para asegurar que el efluente reflejara el promedio de los contaminantes generados en un ciclo operativo completo, permitiendo así realizar inferencias válidas sobre el caudal residual total

3.5.1. Operacionalización de Variables

En el desarrollo del proyecto de investigación, se define como variable independiente al efluente o el caudal residual generado a partir de todas las actividades de limpieza,

mantenimiento, acopio o enfriamiento en las instalaciones de la industria láctea “Lácteos Fernández Cía. Ltda.”, por otra parte, las variables dependientes son las concentraciones de los contaminantes sujetos análisis, que varían de acuerdo a las acciones derivadas de los procesos de una jornada. En la tabla a continuación se detalla la operacionalización de variables.

Tabla 2 *Matriz de operacionalización de variables*

Variable	Indicador
Muestras de Agua Residual Industrial Láctea	Calidad del agua residual de la Empresa Láctea “Lácteos Fernández Cía. Ltda.”
Concentración de los Contaminantes Físicos y Químicos de las Aguas Residuales Lácteas	Unidades de concentración (mg/l, ppm)

Fuente: Elaboración propia

3.6. Técnicas e Instrumentos de Recolección y Procesamiento de Datos

Para el cumplimiento de los objetivos, se utilizaron técnicas que permitieron tanto la fundamentación teórica como el análisis práctico de los efluentes:

Investigación Documental: Se aplicó el análisis de contenido mediante la revisión de literatura técnica y científica. Se priorizó la revisión de normativas ambientales vigentes (específicamente los límites de descarga para la industria láctea), protocolos de caracterización de aguas y manuales de diseño de sistemas de tratamiento.

Investigación de Campo: Se utilizó la observación directa y la medición in situ. Los instrumentos incluyeron equipos de laboratorio certificados para la medición de parámetros físico-químicos (se empleó el equipo sonda multiparamétrica marca HANNA HI98194-pH/EC/DO) y una libreta de campo para el registro de caudales y condiciones operativas.

Procesamiento y Análisis: Una vez obtenidos los datos primarios y secundarios, se procedió a su tabulación en el software Microsoft Excel. El análisis no se limitó a la descripción estadística, sino que se centró en un análisis comparativo y de eficiencia. Esto permitió comparar la carga contaminante inicial frente a los límites permitidos por la norma, facilitando el cálculo de la eficiencia de remoción necesaria para el diseño de la planta de tratamiento de la empresa Lácteos Fernández Cía. Ltda.

3.7. Caracterización del Efluente

3.7.1. Parámetros de estudio

El proceso de muestreo se llevó a cabo durante un periodo de 6 horas, tiempo en el cual se cubrieron las actividades críticas de acopio y enfriamiento en “Lácteos Fernández”. Para garantizar la integridad de los resultados y evitar la degradación de los componentes, se aplicó el siguiente protocolo unificado bajo los estándares de la Normativas Técnicas Ecuatorianas INEN NTE 2169 Y INEN NTE 2176:

Recolección: Se utilizó un muestreador manual de polietileno de superficie lisa para evitar la alteración del flujo y la contaminación cruzada. Se recolectó un volumen de 1000 ml por muestra, asegurando material suficiente para análisis y repeticiones, minimizando así el error por adsorción.

Envase y Etiquetado: Se emplearon recipientes de plástico y polipropileno, previamente lavados y acondicionados. Cada frasco fue etiquetado de forma permanente con fecha, hora y número del muestreo.

Conservación: Una vez recolectadas las muestras se almacenaron inmediatamente en un contenedor de poliuretano a una temperatura controlada de entre 2 °C y 5 °C en condiciones de oscuridad.

Cadena de Custodia: El traslado al laboratorio se realizó cumpliendo con los tiempos de preservación establecidos y manteniendo refrigeración.

Caracterización del Agua Residual: Posterior a la toma de muestras de agua, las características físicas y químicas del agua residual fueron analizadas en los laboratorios de la Universidad Politécnica Salesiana, para conocimiento de sus técnicas y procedimientos se presenta a continuación.

En la tabla 3 se detalla los métodos de ensayo utilizados para el análisis de parámetros físico-químicos y microbiológicos del agua residual.

Tabla 3 Metodologías de ensayo de análisis de parámetros físicos y químicos

Nro.	Tipo de parámetro	Parámetro	Ensayo / Técnica aplicada	Guía – Norma de referencia
1	Físico-químico	Turbidez	Nefelometría	Standard Methods 2130 B
2	Físico-químico	pH	Potenciometría	Standard Methods 4500-H ⁺ B
3	Físico-químico	DQO	Método colorimétrico	Standard Methods 5220 D
4	Físico-químico	DBO ₅	Método de electrometría	Standard Methods 5210 B
5	Físico-químico	Coagulación-floculación	Ensayo de Jarras (Jar Test)	Standard Methods 2120
6	Microbiológico	Coliformes totales	Método NMP / filtración por membrana	Standard Methods 9222 B

Fuente: Elaboración propia

Con el fin de obtener muestras representativas para el análisis de calidad del agua residual, se estableció un punto de muestreo en el área de descarga del efluente de la empresa. En la siguiente figura se presenta la ubicación y condiciones del sitio seleccionado para la toma de muestras.



Figura 2. Punto de muestreo para toma de datos

Fuente: Elaboración propia a partir de trabajo de campo

3.8. Caracterización del Efluente

3.8.1. Índice de biodegradabilidad

El índice de biodegradabilidad representa una relación utilizada para determinar la facilidad con la que la materia orgánica presente en un agua residual puede ser degradada a través de tratamientos biológicos. Este índice se calcula comúnmente como la proporción entre la Demanda Bioquímica de Oxígeno a cinco días (DBO_5) y la Demanda Química de Oxígeno (DQO).

De acuerdo con Metcalf & Eddy, (2014) y estudios recientes, un índice $BOD_5/COD > 0.5$ indica alta biodegradabilidad, lo cual sugiere que el tratamiento biológico convencional es viable. En cambio, valores inferiores a 0.3 implican la presencia de compuestos recalcitrantes que requieren tratamientos avanzados.

La siguiente tabla presenta los criterios de tratamiento establecidos en función del índice de biodegradabilidad del agua residual

Tabla 4: Criterios de tratamiento de acuerdo con el índice de biodegradabilidad

Índice DBO₅/DQO	Nivel de Biodegradabilidad	Implicaciones para el tratamiento	Tipo de tratamiento recomendado
> 0.5	Alta	Mayor parte de la materia orgánica es fácilmente biodegradable	Tratamiento biológico convencional
0.3 – 0.5	Moderada	Parte de la carga orgánica es biodegradable, pero existen compuestos más resistentes	Tratamiento combinado (físico + biológico)
< 0.3	Baja	Presencia significativa de compuestos recalcitrantes o tóxicos	Tratamientos avanzados o específicos: oxidación avanzada, electroquímico, Fenton, carbón activado

Fuente: (Metcalf & Eddy, 2014).

El Índice de Biodegradabilidad está dado por:

$$\text{Índice de biodegradabilidad} = \frac{DBO_5}{DQO}$$

3.9. Diseño de Infraestructura Hidráulica

El proceso de modelamiento y diseño del sistema de tratamiento de aguas residuales provenientes de la industria láctea se fundamentó en referencias bibliográficas previamente desarrolladas, las cuales fueron adaptadas y modificadas para este estudio. Las fuentes utilizadas incluyen los proyectos titulados: “Diseño de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Generadas en la Industria 'Lácteos del Valle', en el Cantón Chaco - Provincia de Napo”, “Diseño de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la Industria 'Lácteos Mi Veleta', Chambo - Chimborazo” y “Diseño de una Planta de Tratamiento de Agua Residual de una Empresa Procesadora de Lácteos Ubicada en la Parroquia de Mulaló del Cantón Latacunga, Provincia de Cotopaxi” (Toapanta, 2024b; Tucunango, 2023; Valdivieso, 2023).

3.9.1. Determinación del Caudal

Para el diseño hidráulico de la infraestructura, se realizó la estimación del caudal mediante el método volumétrico. Este procedimiento se efectuó en el punto de descarga final, previo al ingreso a la caja de revisión, durante una jornada laboral típica para capturar las variaciones reales de la operación.

El cálculo se basa en la relación entre el volumen recolectado y el tiempo de llenado, mediante la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{V}{t}$$

Donde:

Q= caudal

V= velocidad

t=tiempo

3.9.2. Factor de Seguridad

En el diseño de infraestructuras de tratamiento de aguas residuales, es imperativo prever las variaciones estacionales, los picos de producción y los posibles incrementos en la carga contaminante. Por ello, se establece un Factor de Seguridad (FS) como margen de reserva hidráulica.

De acuerdo con la literatura técnica para plantas de tratamiento industriales, este factor suele oscilar entre el 10% y el 50%. Para este proyecto, se ha seleccionado un factor del 20%, el cual se aplicará al caudal promedio obtenido en los aforos

La fórmula para integrar este criterio al diseño final es:

$$Q_s = Q * (FS)$$

Donde:

Q_s : Caudal final de diseño hidráulico.

Q : Caudal medio obtenido mediante aforos volumétricos.

FS: Factor de seguridad expresado en decimales (0.20).

3.10. Ensayos de coagulación–floculación (Jar Test)

Para determinar el tratamiento primario óptimo, se diseñaron tres ensayos independientes de coagulación-floculación. El procedimiento se centró en variar el tipo de coagulante (PAC y Sulfato de Aluminio), las dosificaciones y el uso de coadyuvantes (poliméricos Anicónico y Polidadmac), manteniendo condiciones de agitación controladas. Los parámetros críticos de evaluación para definir el éxito del tratamiento fueron la turbidez final, el porcentaje de remoción y el comportamiento del pH.

Previo a los ensayos se prepararon soluciones madre de los coagulantes y coadyuvantes empleando agua destilada y balones volumétricos de 250 ml, garantizando concentraciones controladas y repetibilidad en la dosificación. Las soluciones preparadas fueron policloruro de aluminio (PAC) y sulfato de aluminio a una concentración de 10 g/L, mientras que el polímero catiónico Polidadmac se preparó a 1 g/L y el polímero aniónico a 0.1 g/L, permitiendo dosificar concentraciones operativas entre 5 y 50 mg/L sin sobrepasar el rango crítico de floculación

Cada vaso del equipo de prueba fue cargado con 500 ml de agua residual cruda proveniente de la planta de leche, caracterizada por alta turbidez y elevada carga orgánica. Las condiciones operativas del ensayo consistieron en una mezcla rápida a 120 rpm durante 6 minutos para dispersar uniformemente el coagulante, seguida de una mezcla lenta a 30 rpm durante 20 minutos para favorecer la formación de flóculos, y finalmente un periodo de sedimentación de 30 minutos antes de realizar las mediciones finales de turbidez y pH

El diseño experimental contempló la evaluación de dos tipos de coagulantes, PAC y sulfato de aluminio, combinados con dos tipos de coadyuvantes, Polidadmac y polímero aniónico, variando además las dosis de coagulante entre 10, 20 y 30 mg/L y las dosis de coadyuvante entre 0.5 y 1.0 mg/L. También se incluyeron vasos control sin adición de reactivos para comparar el comportamiento del agua sin tratamiento

Los volúmenes de solución añadidos en cada vaso fueron calculados a partir de las concentraciones madre preparadas, empleándose por ejemplo 0.5, 1.0 y 1.5 ml de coagulante para lograr dosis de 10, 20 y 30 mg/l respectivamente en los vasos de 500 ml. Para el caso de los coadyuvantes, se dosificaron volúmenes menores debido a su mayor eficiencia, utilizándose aproximadamente 0.25 ml de Polidadmac o hasta 2.5 ml de polímero aniónico según la combinación evaluada.

En cada ensayo se utilizaron distintos volúmenes de agua residual y diferentes combinaciones y dosis de coagulantes y coadyuvantes, tal como se evidencia en las tablas 24,25 y 26 , permitiendo analizar el desempeño del proceso de coagulación–floculación bajo diversas condiciones experimentales.

Durante cada ensayo se registraron parámetros iniciales y finales como pH y turbidez, permitiendo calcular la eficiencia de remoción y comparar el desempeño de cada combinación coagulante–coadyuvante.

Este procedimiento permitió identificar las combinaciones más eficientes para la reducción de turbidez y mejora de la calidad del efluente, estableciendo las bases para la selección del tratamiento adecuado para el agua residual de Lácteos Fernández Cía.Ltda.

3.11. Metodología para el diseño del sistema de tratamiento

El diseño del sistema de tratamiento se realizó a partir de los resultados de caracterización y de los ensayos Jar Test, considerando criterios técnicos establecidos en la literatura revisada. Se incluyeron unidades de pretratamiento, tratamiento físico-químico y sedimentación, dimensionadas en función del caudal y las cargas contaminantes determinadas.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presenta la propuesta técnica del sistema para el tratamiento de los efluentes de la empresa “Lácteos Fernández Cía. Ltda.”. El diseño se fundamenta en la caracterización físico-química previa, la cual permitió dimensionar las unidades necesarias para asegurar que la descarga final cumpla con los límites establecidos en la normativa ambiental para cuerpos de agua dulce.

4.1. Contextualización de las Actividades Operativas

A través de una entrevista realizada a la Ing. Paola Encalada, bioquímica farmacéutica y jefa de planta de la empresa, se detallaron las diferentes actividades de acopiamiento de leche cruda, con el objeto de contextualizar e identificar el tipo de muestreo y técnica.

La empresa inicia sus actividades de acopio con el lavado de los silos de almacenamiento, para aquellas actividades realiza un lavado con legías y productos de comportamiento ácido-base, acompañado de enjuague abundante con agua potable. Finaliza con sellados al vapor.

Las actividades de adecuamiento y limpieza de los silos de almacenamiento garantizan la inocuidad de la leche cruda y el cumplimiento de los estándares de calidad de la misma.

El acopio de leche cruda inicia con la recepción de los tanqueros, se realiza una toma de muestra y posterior es analizada en el laboratorio de bromatología. Aquellas muestras de leche que no cumplan los estándares de calidad efectuados por la normativa vigente de Agrocalidad son rechazadas.

Por otra parte, aquellas muestras que cumplen los estándares de calidad y normativa aplicable se incorporan al proceso de vaciado en tinas, posterior inicia el bombeo y almacenamiento en los silos.

Las capacidades de almacenaje de la fábrica “Lácteos Fernández” asciende a los 23 mil litros y su capacidad de enfriamiento asciende a 47 mil litros.

El proceso de enfriamiento consiste en disminuir la temperatura de la leche en un rango establecido entre los 2 – 4 °C, incorporando al sistema un enfriamiento por conducción de agua a través de tubería.

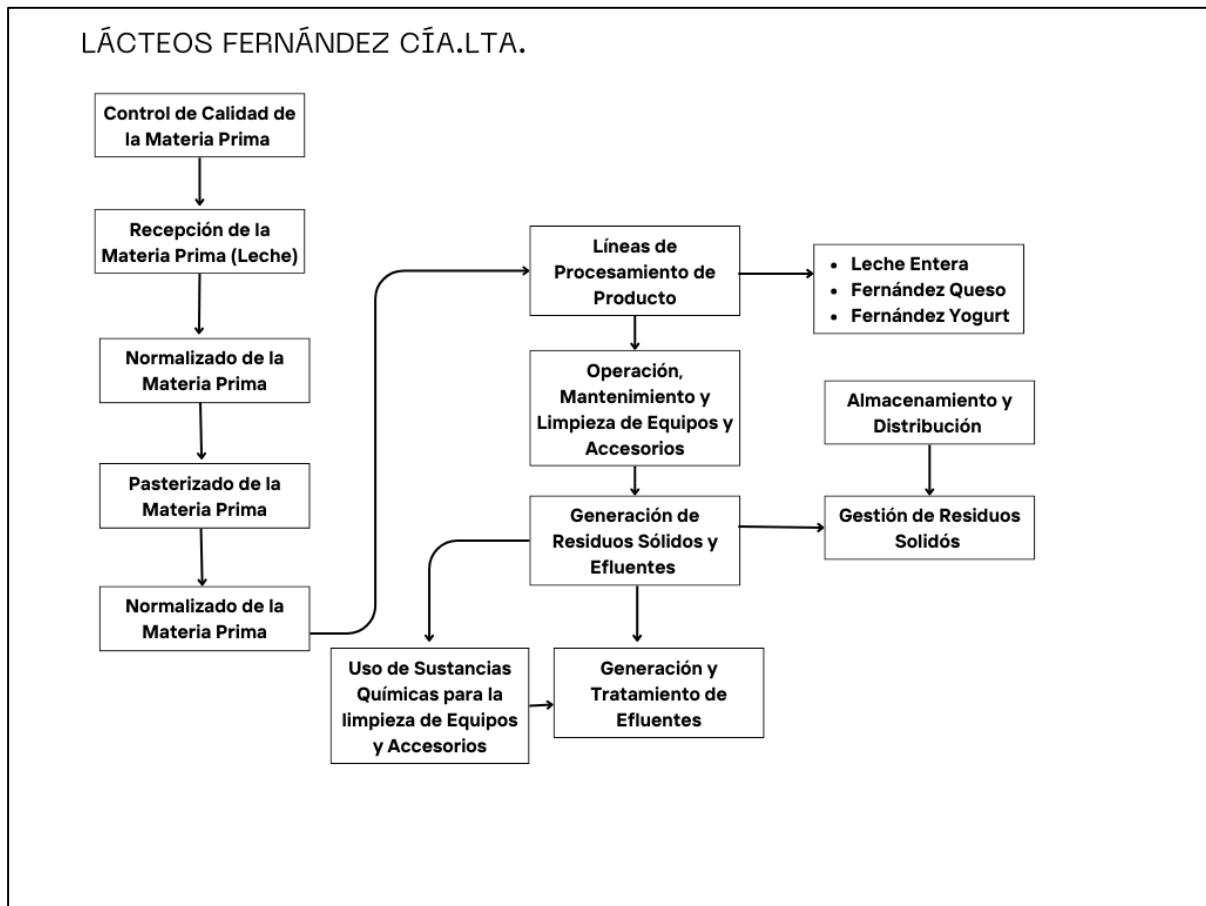


Figura 3 Diagrama de flujo de energía de la empresa “Lácteos Fernández Cía. Ltda.”

Fuente: Elaboración propia

4.2. Análisis de la Caracterización del Agua Residual

La determinación precisa de la carga contaminante es la base fundamental para un diseño eficiente. En este estudio se realizaron tres ensayos de laboratorio tipo Jar Test y mediciones directas. Los valores presentados en la Tabla 5 representan el promedio de dichos ensayos, a excepción de la DBO₅, cuyo valor se obtuvo del tercer monitoreo.

Tabla 5. Resultados de la caracterización del agua residual “Lácteos Fernández Cía. Ltda”

Parámetro	Unidad	Valor Inicial	Método de Análisis
pH	–	6.84	Potenciométrico (In situ)
Potencial óxido-reducción	mV	-159.70	Sonda multiparamétrica
Oxígeno disuelto	mg/L	59.80	Sonda multiparamétrica
Conductividad	μS/cm	856.00	Sonda multiparamétrica
Sólidos Disueltos Totales (TDS)	mg/L	427.30	Sonda multiparamétrica
Turbidez	NTU	1440.00	Turbidimetría
Salinidad	PSU	0.42	Sonda multiparamétrica
Temperatura	°C	16.65	Termometría (In situ)
DBO ₅	mg/L	880.00	Método Standard 5210-B
DQO	mg/L	2341.00	Digestión y Colorimetría

Fuente: Elaboración propia

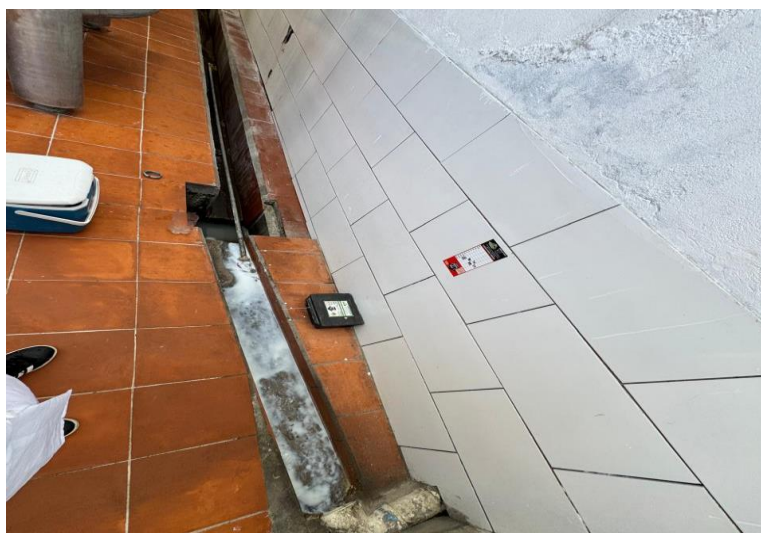


Figura 4. Canal de descarga de las aguas residuales de la empresa láctea

Fuente: Elaboración propia a partir de trabajo de campo

4.3. Comparación con el Marco Legal Ambiental Aplicable

Para evaluar la magnitud del impacto, se contrastaron los resultados con los límites máximos permisibles definidos en el Acuerdo Ministerial 097-A (TULSMA).

La Tabla 6 presenta la comparación entre los resultados obtenidos en la caracterización del agua residual y los límites máximos permisibles establecidos en el Acuerdo Ministerial 097-A (TULSMA), con el fin de evaluar el cumplimiento normativo del efluente generado.

Tabla 6. Comparación de la caracterización con la normativa vigente

Parámetro	Unidad	Valor Inicial	Límite AM 097-A	Cumple
pH	–	6.84	5 – 9	Sí
Turbidez	NTU	1440.00	No determinado*	-
DQO	mg/L	2341.00	100	No
DBO₅	mg/L	880.00	50	No
TDS	mg/L	427.30	1600	Sí
Temperatura	°C	16.65	< 35	Sí

Fuente: Elaboración propia

Al contrastar los resultados obtenidos con los límites establecidos en el Acuerdo Ministerial 097-A (TULSMA), se identifican puntos críticos que precisan la base del diseño hidráulico. En primera instancia, el pH y la temperatura se encuentran dentro de los rangos permitidos, lo que facilita la implementación de procesos biológicos. De igual manera, los Sólidos Disueltos Totales (STD) cumplen con la normativa, situándose por debajo del límite de 1600 mg/L.

Sin embargo, el incumplimiento más severo se observa en la carga orgánica. La DQO alcanza los 2341 mg/L y la DBO₅ los 880 mg/L, valores que superan ampliamente los límites de 100 mg/L y 50 mg/L, respectivamente. Esta diferencia técnica evidencia que el efluente de "Lácteos Fernández" posee una carga contaminante biodegradable sumamente alta.

Finalmente, la turbidez registrada de 1440 NTU, aunque no posee un límite numérico fijo en la Tabla 9 del TULSMA, se considera excesiva para una descarga normativamente responsable. Los resultados confirman que el agua residual se encuentra en un estado de contaminación

activa que justifica la integración de un sistema de tratamiento primario para reducir la materia orgánica a niveles legales.

4.4. Índice de biodegradabilidad

El índice de biodegradabilidad es de 0.375 por lo tanto, se asume que el efluente de la planta de acopio o enfriamiento de leche presenta una biodegradabilidad moderada, se plantea el diseño de la infraestructura para tratamiento netamente físico.

4.5. Evaluación de los Ensayos de Coagulación–Floculación (Jar Test)

Los resultados de los ensayos demuestran la alta variabilidad del efluente lácteo y su respuesta ante distintos agentes químicos. A continuación, se detallan los hallazgos de cada fase experimental:



Figura 5. Ensayos Jar Test realizados

Fuente: Elaboración propia

4.6. Tratamientos ensayados

Los tratamientos que se usaron en el estudio fueron coagulantes y coadyuvantes experimentando con diferentes combinaciones y dosis dependiendo el ensayo realizado

Tabla 7 Tratamientos utilizados en el estudio

Coagulante	Coadyuvante
Policloruro de aluminio(PAC)	
PAC	Sulfato de aluminio
PAC	Polímero aniónico
PAC	POLIDAD MAC

Fuente: Elaboración propia

4.7. Variación del pH en los ensayos Jar Test

4.7.1. Variación del pH en el ensayo experimental 1

En este ensayo se aplicó un volumen de 500 ml en cada vaso, el comportamiento del pH a lo largo de los ensayos experimentales muestra una tendencia relativamente estable, con valores mayoritariamente comprendidos entre 5,7 y 5,9, lo que indica un medio ligeramente ácido durante la mayoría de las pruebas (83%), y cuyo valor indica compromiso con la normativa ambiental ecuatoriana que establece un valor de entre 5 y 9.

Sin embargo, en el ensayo número 1 se observan valores elevados de pH cercanos a 9,8 los cuales corresponden al agua cruda sin tratamiento alguno. La estabilidad del pH en la mayoría de los ensayos es un aspecto favorable, ya que permite evaluar la eficiencia de la coagulación sin variaciones extremas que afecten el desempeño del proceso.

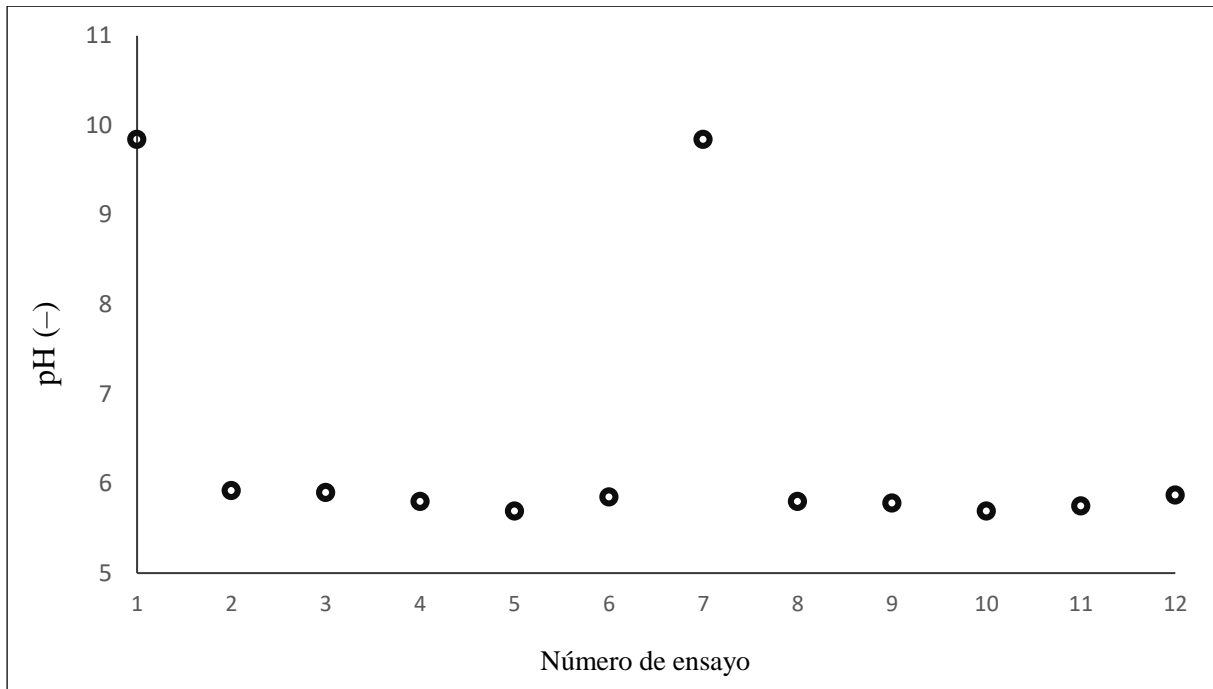


Figura 6. Variación del pH en el ensayo Jar Test número 1

Fuente: Elaboración propia

4.7.2. Variación del pH en el ensayo experimental 2

El volumen de agua residual utilizada en el ensayo 2 fue de 600 ml en cada vaso, el efluente presentó un pH inicial promedio de 6.34, valor ligeramente ácido, típico de efluentes provenientes del lavado de equipos en la industria láctea debido a la presencia de materia orgánica y residuos de limpieza, tras la aplicación de los distintos tratamientos de coagulación–floculación, se observó que el pH final se mantuvo en un rango entre 6.04 y 6.48, evidenciando variaciones moderadas dependiendo del tipo y dosis de coagulante utilizado.

Los tratamientos con PAC mostraron variaciones mínimas de pH, manteniéndose cercanos al valor inicial e incluso presentando ligeros incrementos en algunos casos (hasta 6.48), lo que indica un bajo consumo de alcalinidad y una mayor estabilidad química del proceso.

En contraste, los ensayos realizados con sulfato de aluminio presentaron una ligera disminución del pH, alcanzando valores cercanos a 6.15–6.28, comportamiento esperado debido a que este coagulante tiende a consumir alcalinidad durante la formación de hidróxidos de aluminio.

Cuando se emplearon coadyuvantes poliméricos, tanto Polidadmac como polímero aniónico, no se observaron cambios significativos adicionales en el pH, lo que indica que estos compuestos no alteran de forma considerable la acidez del sistema.

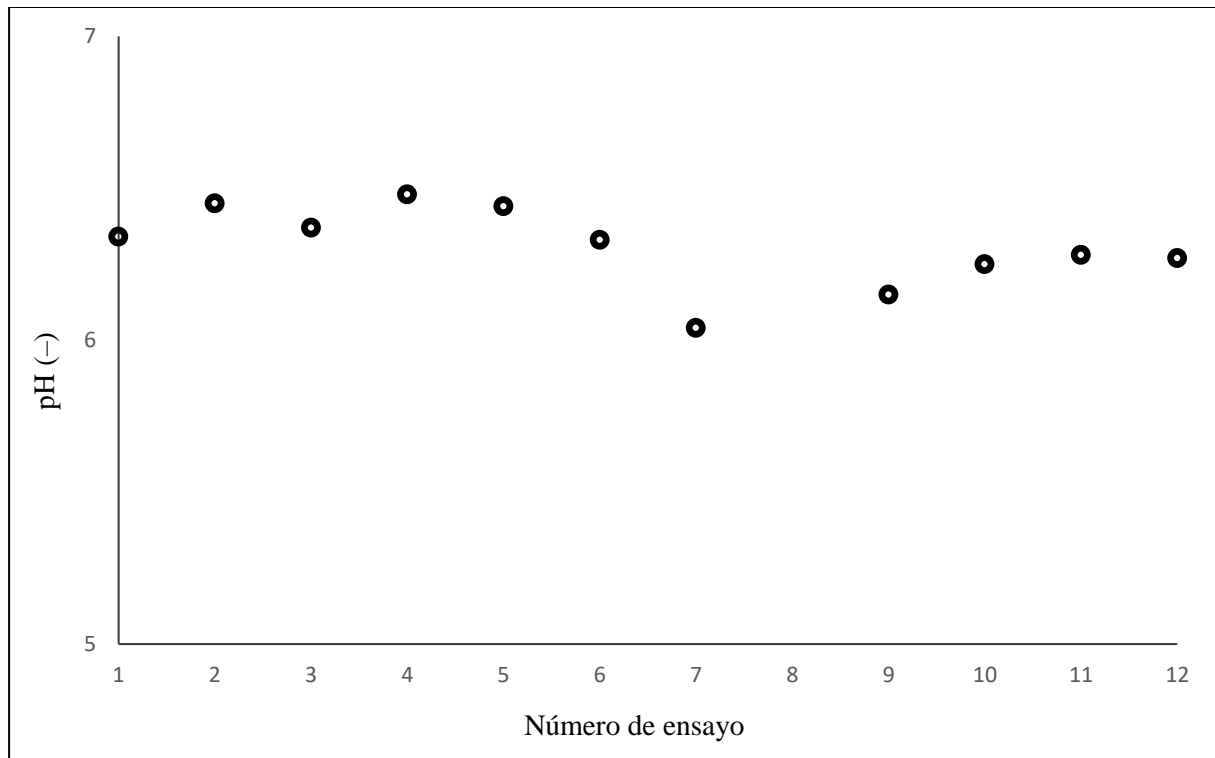


Figura 7 Variación del pH en el ensayo Jar Test número 2

Fuente: Elaboración propia

4.7.3. Variación del pH en el ensayo experimental 3

En el Ensayo Jar Test 3 se trabajó con un volumen de 800 ml de agua residual por vaso, evaluando diferentes combinaciones de coagulantes y coadyuvantes para determinar su eficiencia en la reducción de turbidez y la estabilidad del pH. El agua residual presentó un pH inicial promedio de 4.34, evidenciando un carácter ácido evidenciando un efluente con alta carga orgánica.

Respecto a la variación del pH, se observó que después del tratamiento los valores finales se mantuvieron en un rango entre 3.95 y 4.40, mostrando cambios leves entre tratamientos. El uso de PAC generó ligeras reducciones de pH, especialmente a mayores dosis, mientras que la

aplicación de polímeros como coadyuvantes no produjo alteraciones significativas, manteniendo la estabilidad química del sistema.

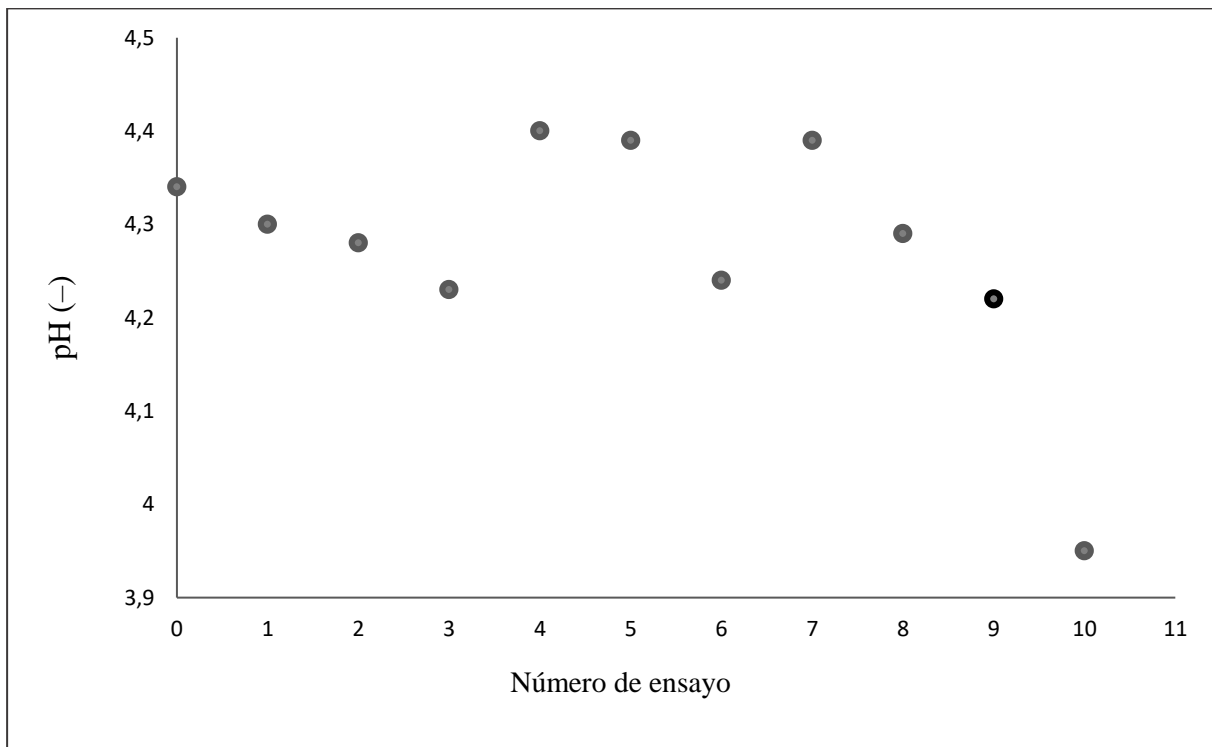


Figura 8 Variación del pH en el ensayo Jar Test número 3

Fuente: Elaboración propia

4.8. Variación de la turbidez en función del ensayo experimental

4.8.1. Variación de la turbidez en función del ensayo experimental Jar Test 1

El gráfico evidencia una alta turbidez inicial que alcanza los 1000 NTU y se mantiene en los ensayos E1, E2, E7 y E8, los cuales representan el agua residual sin tratamiento o con condiciones de coagulación no efectivas. Estos valores reflejan la elevada carga de sólidos suspendidos característica de los efluentes generados en la industria láctea.

Por el contrario, desde el ensayo E3 hasta el E6, se observa una reducción significativa de la turbidez, alcanzando valores inferiores a 50 NTU, lo que indica una mejora sustancial en la

remoción de partículas suspendidas, asociada a la aplicación de coagulantes y condiciones de mezcla más favorables.

En los ensayos E9 a E12, la turbidez presenta valores intermedios, con resultados que oscilan aproximadamente entre 50 y 200 NTU, lo cual sugiere que, si bien existe una remoción parcial de sólidos, las condiciones de dosificación o el tipo de tratamiento aplicado no logran la eficiencia observada en los ensayos óptimos.

En conjunto, el gráfico permite identificar claramente los ensayos con mayor eficiencia de remoción de turbidez, información clave para la selección de las condiciones de diseño del sistema de tratamiento.

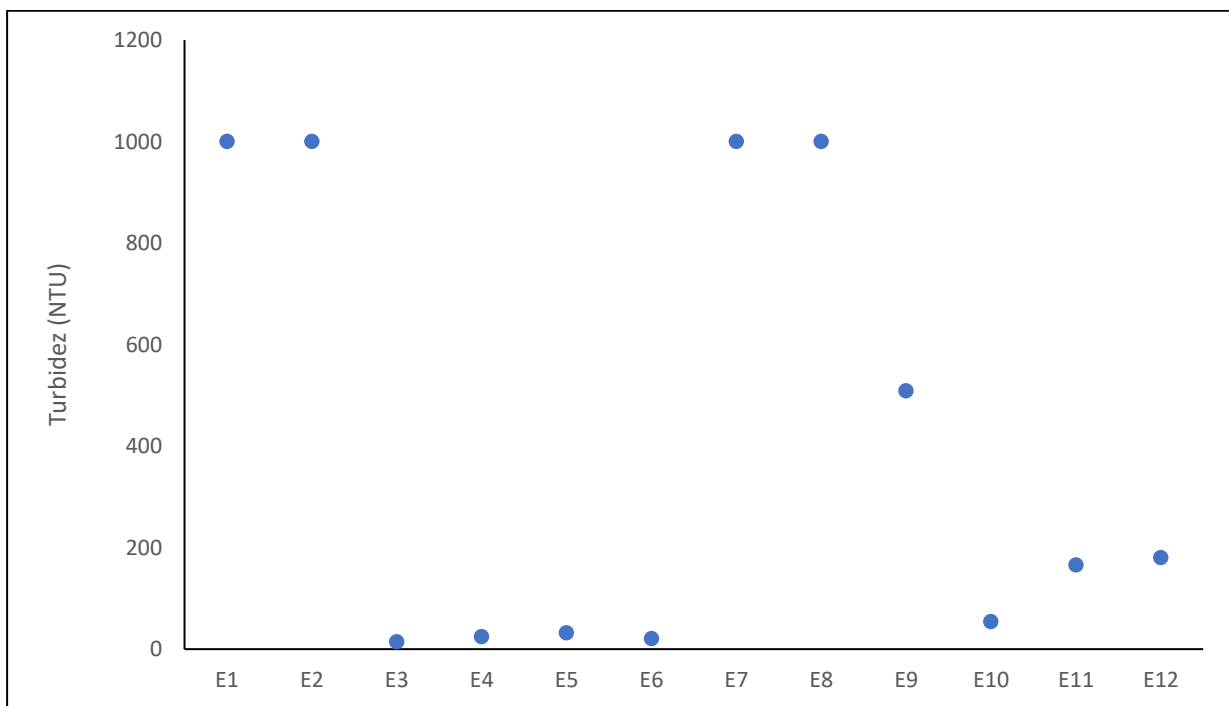


Figura 9 Variación de la turbidez en función del ensayo experimental Jar Test número 1

Fuente: Elaboración propia

4.8.2. Variación de la turbidez en función del ensayo experimental Jar Test 2

En el Ensayo Jar Test 2, la turbidez inicial registrada fue de 2320 NTU, valor que evidencia la elevada presencia de sólidos suspendidos y materia coloidal característica del agua residual

generada en el proceso industrial lácteo. Este valor se mantuvo en los vasos utilizados como control o en aquellos donde la dosificación aplicada no fue suficiente para producir una coagulación efectiva. Sin embargo, en los vasos donde se aplicaron adecuadamente los coagulantes y coadyuvantes, la turbidez fue disminuyendo progresivamente, alcanzando valores finales significativamente menores, lo que demuestra la efectividad del proceso de coagulación–floculación en la remoción de partículas suspendidas conforme mejoraban las condiciones de tratamiento.

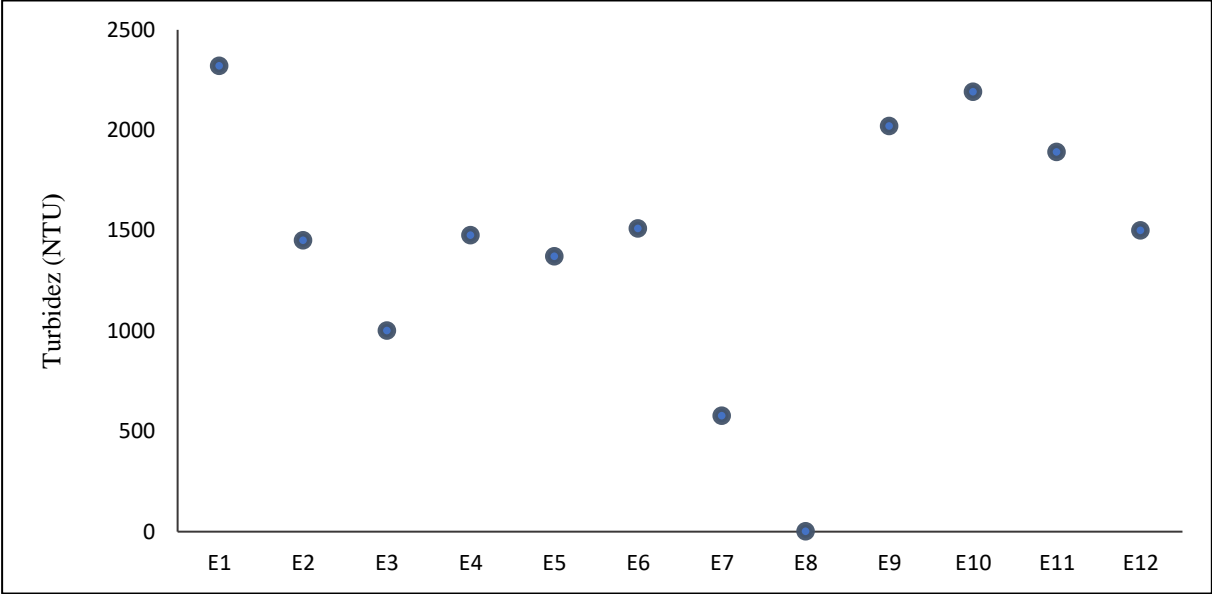


Figura 10 Variación de la turbidez en función del ensayo experimental Jar Test número 2

Fuente: Elaboración propia

4.8.3. Variación de la turbidez en función del ensayo experimental Jar Test 2

En el Ensayo Jar Test 3, la turbidez inicial registrada fue de 1000 NTU, lo que refleja una elevada presencia de sólidos suspendidos y materia orgánica en el agua residual analizada. Este valor se mantuvo en los vasos sin tratamiento o en aquellos donde la dosificación aplicada no permitió una coagulación efectiva. No obstante, en los vasos donde se aplicaron correctamente los coagulantes y coadyuvantes, la turbidez fue disminuyendo de manera considerable,

alcanzando valores finales muy bajos, lo que demuestra una adecuada formación y sedimentación de flocúlos durante el proceso.

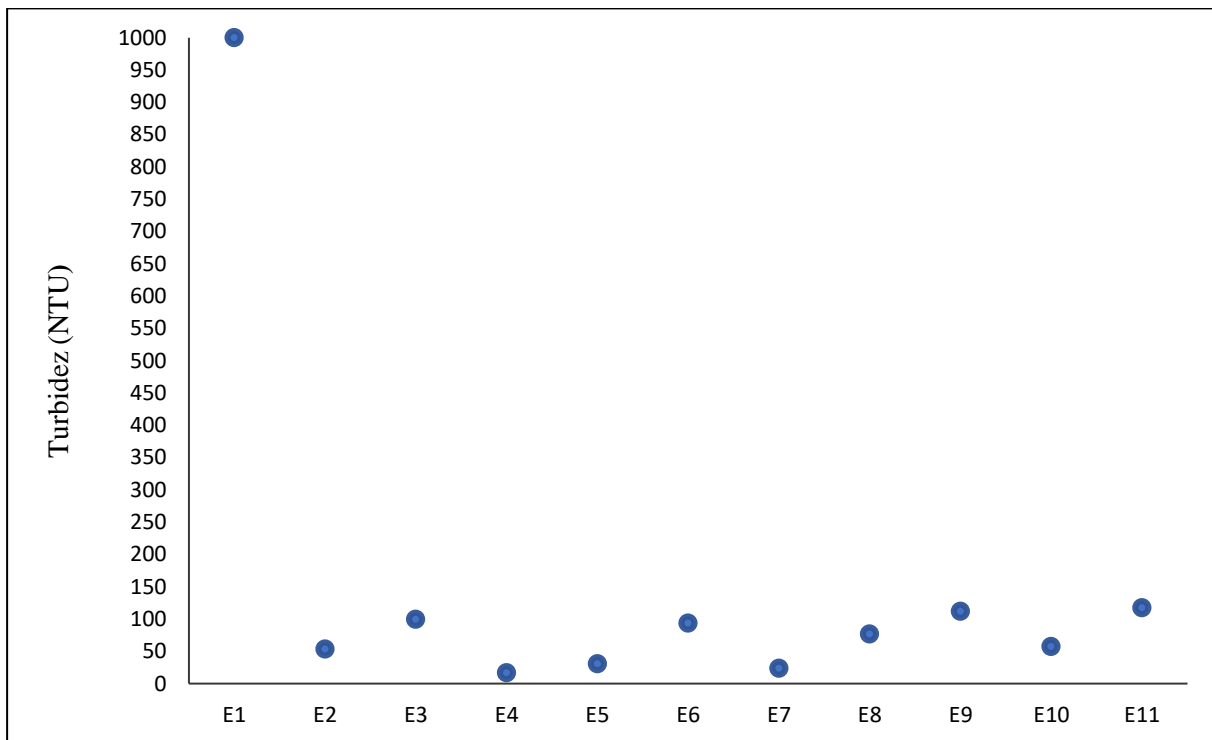


Figura 11 Variación de la turbidez en función del ensayo experimental Jar Test número 2

Fuente: Elaboración propia

4.9. Variación de la turbidez según tipo de tratamiento

4.9.1. Variación de la turbidez según el tipo de tratamiento en el ensayo Jar test 1

El gráfico comparativo muestra claramente la eficiencia relativa de los diferentes tratamientos aplicados. El agua sin tratamiento presenta valores de turbidez cercanos a 1000 NTU, confirmando la elevada contaminación inicial del efluente.

El uso de coagulantes individuales, como el PAC y el sulfato de aluminio, logra una reducción parcial de la turbidez; sin embargo, los valores finales aún se mantienen elevados en algunos casos, especialmente cuando no se emplean coadyuvantes.

Por otro lado, los tratamientos combinados, particularmente PAC + polímero aniónico y sulfato de aluminio + polímero aniónico, presentan las menores turbideces finales, con valores inferiores a 50 NTU, evidenciando una mayor eficiencia en la formación y sedimentación de flóculos.

Estos resultados demuestran que la adición de polímeros como coadyuvantes mejora significativamente el proceso de coagulación-floculación, optimizando la remoción de sólidos suspendidos y constituyéndose en la alternativa más adecuada para el diseño del sistema de tratamiento propuesto.

La figura 12 presenta el comportamiento de la turbidez final en función del tipo de tratamiento aplicado durante los ensayos. Este análisis gráfico permite identificar la eficiencia de los agentes coagulantes y coadyuvantes bajo las condiciones críticas del efluente lácteo:

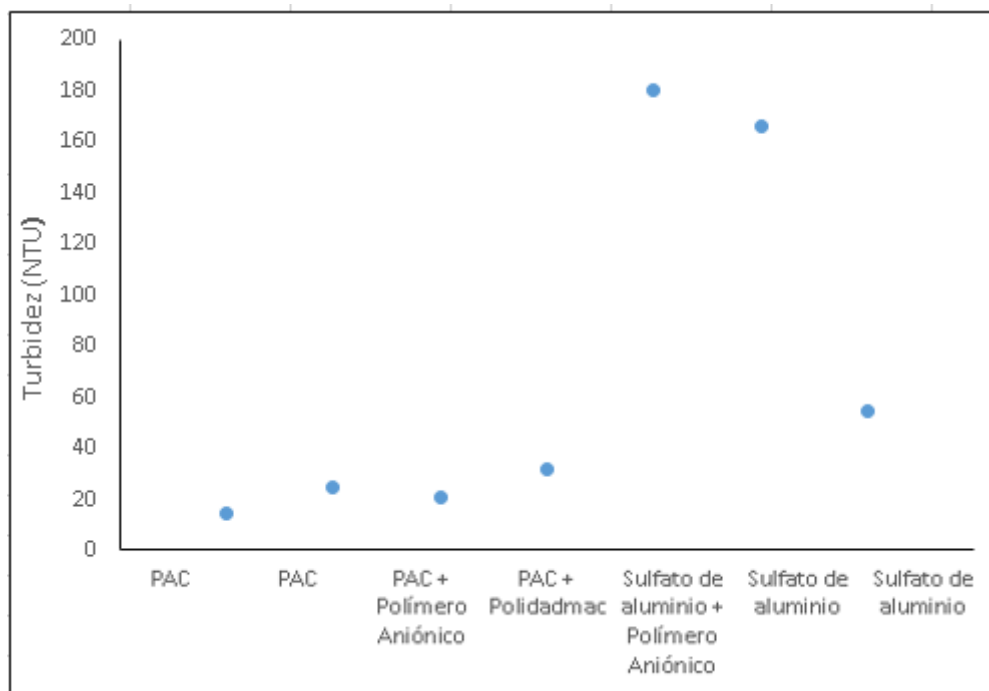


Figura 12. Variación de la turbidez según tipo de tratamiento aplicado en el ensayo Jar Test 1

Fuente: Elaboración propia

4.9.2. Variación de la turbidez según el tipo de tratamiento en el ensayo Jar test 2

Durante el ensayo 2 se aplicaron tratamientos empleando PAC y sulfato de aluminio, tanto de forma individual como en combinación con coadyuvantes como Polidadmac y polímero aniónico, variando las dosis para evaluar la eficiencia de remoción.

Los mejores resultados se obtuvieron con el uso de PAC combinado con coadyuvantes, alcanzando turbideces finales cercanas a 576 NTU, lo que representa una reducción significativa de sólidos suspendidos. En contraste, los tratamientos aplicados únicamente con sulfato de aluminio presentaron menores eficiencias de remoción.

En general, el ensayo permitió determinar que el uso de PAC, especialmente acompañado de coadyuvantes, ofrece mejores condiciones de clarificación del efluente.

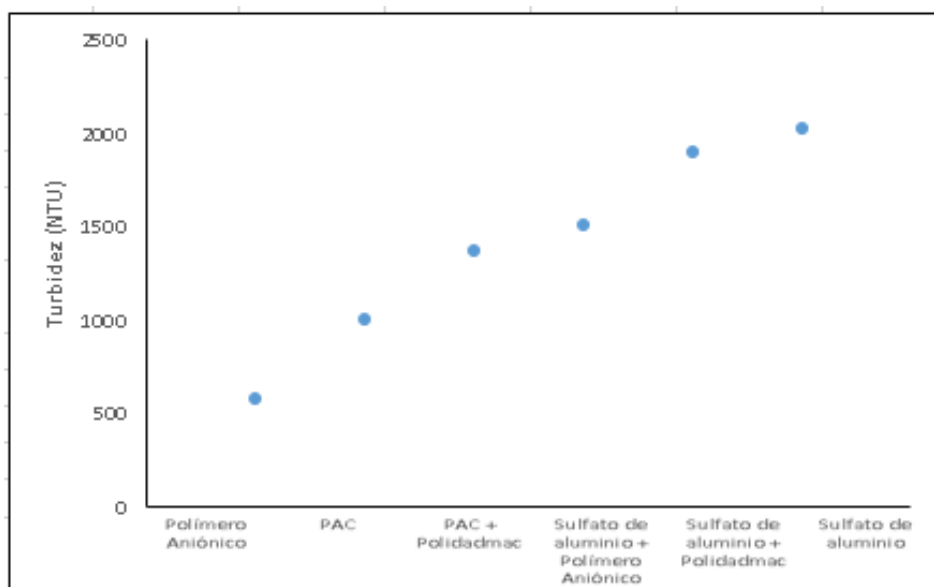


Figura 13 Variación de la turbidez según tipo de tratamiento aplicado en el ensayo Jar Test 2

Fuente: Elaboración propia

4.9.3. Variación de la turbidez según el tipo de tratamiento en el ensayo Jar test 3

En este ensayo se evaluaron diferentes combinaciones utilizando PAC, sulfato de aluminio y polímeros como coadyuvantes, modificando las dosis para identificar las condiciones más eficientes de tratamiento. Los mejores resultados se obtuvieron con la aplicación de PAC solo y combinado con polímeros, alcanzando turbideces finales inferiores a 30 NTU, lo que representa eficiencias de remoción superiores al 95 %, evidenciando una notable mejora en la clarificación del efluente. En contraste, los tratamientos basados únicamente en sulfato de aluminio o en polímeros presentaron reducciones intermedias de turbidez, sin alcanzar los valores óptimos observados con PAC.

En general, el ensayo confirma que el PAC constituye el coagulante más eficiente para el tratamiento del efluente analizado, especialmente cuando se emplea en combinación con coadyuvantes que favorecen la formación de flóculos estables y su posterior sedimentación.

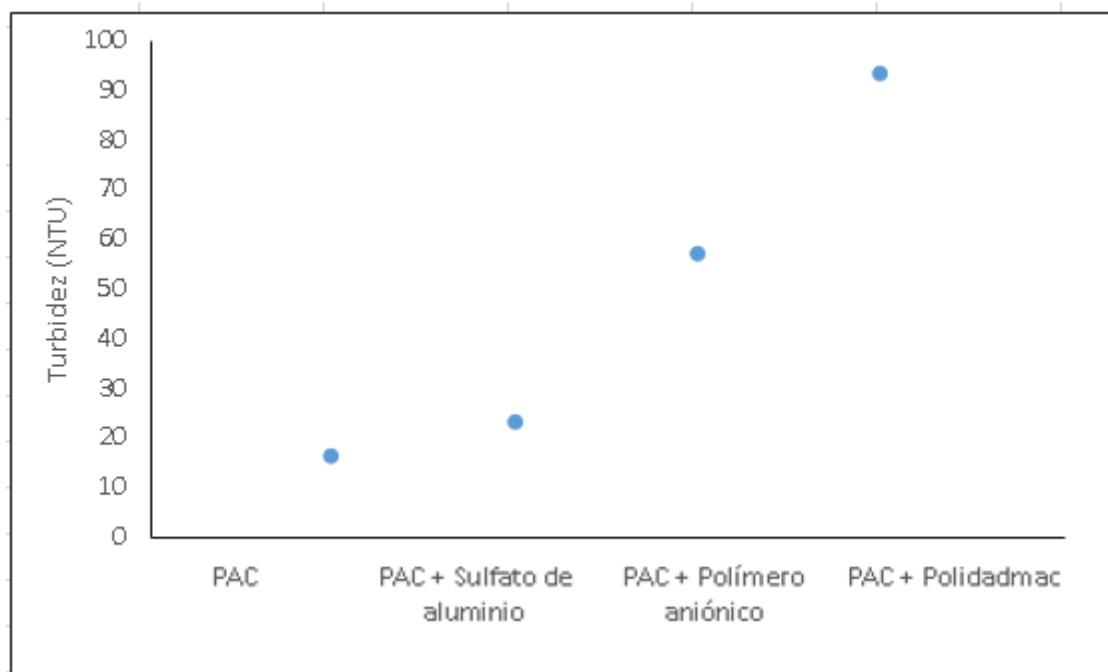


Figura 14 Variación de la turbidez según tipo de tratamiento aplicado en el ensayo Jar Test 2

Fuente: Elaboración propia.

Rendimiento del PAC: En los tres ensayos realizados, el policloruro de aluminio (PAC) mostró el mejor desempeño como coagulante principal, logrando las mayores reducciones de turbidez y una formación rápida de flóculos sedimentables. En particular, en los ensayos 1, 2 y 3 se alcanzaron turbideces finales significativamente menores cuando se utilizó PAC, evidenciando eficiencias de remoción superiores respecto a otros tratamientos. Además, el pH del agua tratada presentó variaciones moderadas, indicando un menor consumo de alcalinidad y mayor estabilidad del proceso.

Rendimiento de Combinación PAC + Sulfato de Aluminio: Al integrar PAC con sulfato de aluminio, se observó una mejora moderada en algunos tratamientos respecto al uso individual del sulfato de aluminio; sin embargo, los resultados obtenidos no superaron el rendimiento alcanzado con PAC utilizado de forma independiente o combinado con polímeros. En general, esta combinación permitió una remoción aceptable de turbidez, aunque con mayor variación de pH y menor estabilidad en la formación de flóculos en comparación con los tratamientos óptimos.

Rendimiento con Coadyuvantes Poliméricos: La incorporación de coadyuvantes poliméricos, como Polidadmac y polímero aniónico, permitió mejorar la formación, tamaño y estabilidad de los flóculos en los tres ensayos, incrementando la eficiencia de sedimentación y reduciendo la turbidez final del agua tratada. Los mejores resultados se obtuvieron cuando estos polímeros fueron aplicados junto con PAC, logrando mayores porcentajes de remoción y un sobrenadante más claro, lo que confirma la importancia de los coadyuvantes en la optimización del proceso de coagulación–floculación.

4.9.4. Análisis del Ensayo 1

En esta fase inicial, el Policloruro de Aluminio (PAC) demostró una superioridad técnica sobre el sulfato de aluminio. Con una dosis de apenas 3 mg/L de PAC, se logró reducir la turbidez de 1000 NTU a 14.6 NTU, alcanzando una eficiencia de remoción del 98.5%. Se observó que, aunque el sulfato de aluminio mejora con coadyuvantes, no iguala la capacidad de clarificación del PAC en dosis bajas.

En la siguiente tabla se logra evidenciar que combinaciones de coagulantes y coadyuvantes resultaron mejor para este ensayo.

Tabla 8 Resultados óptimos del ensayo de Jar test número 1

ENSAYO1									
Resultados óptimos obtenidos en el Ensayo									
Tratamiento	Coagulante	Dosis del coagulante (mg/L)	Coadyuvante	Dosis del coadyuvante (mg/L)	pH previo al tratamiento	pH posterior al tratamiento	Turbidez inicial (NTU)	Turbidez final (NTU)	Porcentaje de Remoción (%)
PAC	PAC	3	No aplica	No aplica	9.84	5.9	1000	14.6	98.5
PAC	PAC	3.5			9.84	5.8	1000	24.5	97.6
PAC + Polímero Aniónico	PAC	4	Polímero aniónico	5	9.84	5.85	1000	21	97.2
PAC + Polidadmac	PAC	4	POLDADMAC	0.25	9.84	5.69	1000	31.8	96.9
Sulfato de aluminio + Polímero Aniónico	Sulfato de aluminio	5	Polímero aniónico	2	9.84	5.87	1000	180	82
Sulfato de aluminio	Sulfato de aluminio	4	No aplica	No aplica	9.84	5.75	1000	166	83.4
Sulfato de aluminio	Sulfato de aluminio	3.5			9.84	5.69	1000	54.2	94.6

4.9.5. Análisis del Ensayo 2

El segundo ensayo enfrentó una carga contaminante inicial mucho más alta (2320 NTU). Bajo estas condiciones, el rendimiento de todos los coagulantes disminuyó significativamente. El tratamiento más efectivo fue el uso exclusivo de Polímero Aniónico (10 mg/L), logrando un 75.17% de remoción.

Tabla 9. Resultados óptimos del ensayo de Jar test número 2

ENSAYO 2									
Resultados óptimos obtenidos en el Ensayo									
Tratamiento	Coagulante	Dosis del coagulante (mg/L)	Coadyuvante	Dosis del coadyuvante (mg/L)	pH previo al tratamiento	pH posterior al tratamiento	Turbidez inicial (NTU)	Turbidez final (NTU)	Porcentaje de Remoción (%)
Polímero Aniónico	No aplica	No aplica	Polímero aniónico	10	6.34	5.9	2320	576	75.17
PAC	PAC	10	No aplica		6.34	5.8	2320	1000	56.9
PAC + Polidadmac	PAC	5	POLDADMAC	2	6.34	5.85	2320	1370	40.95
Sulfato de aluminio + Polímero Aniónico	PAC	5	Polímero aniónico	10	6.34	5.69	2320	1500	35.34
Sulfato de aluminio + Polidadmac	Sulfato de aluminio	5	Polidadmac	2	6.34	5.87	2320	1890	18.53
Sulfato de aluminio	Sulfato de aluminio	10	No aplica		6.34	5.75	2320	2020	12.33

4.9.6. Análisis del Ensayo 3

En el tercer ensayo, con un efluente de pH más ácido (4.34), el PAC retomó su eficiencia máxima. Una dosis de 15 mg/L de PAC permitió obtener una turbidez final de 16.5 NTU (98.35% de remoción). Es notable que, en este escenario, el pH se mantuvo estable (4.23), confirmando que el PAC es el agente más viable para el diseño de la planta debido a su consistencia en diferentes rangos de acidez.

Tabla 10. Resultados óptimos del ensayo de Jar test número 3

ENSAYO 3									
Resultados óptimos obtenidos en el Ensayo									
Tratamiento	Coagulante	Dosis del coagulante (mg/L)	Coadyuvante	Dosis del coadyuvante (mg/L)	pH previo al tratamiento	pH posterior al tratamiento	Turbidez inicial (NTU)	Turbidez final (NTU)	Porcentaje de Remoción (%)
PAC	PAC	15	No aplica		4.34	4.23	1000	16.5	98.35
PAC + Sulfato de aluminio	PAC	20	Sulfato de aluminio	20	4.34	4.24	1000	23.3	97.67
PAC + Polímero aniónico	PAC	20	Polímero aniónico	15	4.34	4.22	1000	57.3	94.27
PAC + Polidadmac	PAC	10	POLIDADMAC	5	4.34	4.39	1000	93.2	90.68

4.10. Diseño de la Infraestructura de Tratamiento

El caudal de diseño es el parámetro base para el dimensionamiento de las unidades. A partir de los aforos realizados y aplicando el factor de seguridad del 20%, se establecieron los siguientes valores:

4.10.1. Aforo y Caudal de Diseño

A partir de los aforos volumétricos realizados in situ durante 4 horas de muestreo, se obtuvieron los datos presentados en la Tabla 7.

Tabla 11: Estimaciones de caudal mediante aforos volumétricos

Hora	Actividades / Acciones	Volumen (litros)	Tiempo (segundos)	Caudal Estimado (l/s)
8h:00	Limpieza	10	14	0.71
8h:30	Limpieza	10	12	0.85
9h:00	Acopio	10	18	0.55
9h:30	Acopio	10	20	0.2
10h:00	Acopio	10	18	0.55
10h:30	Acopio	10	19	0.52
11h:00	Acopio	10	15	0.66
11h:30	Enfriamiento	10	20	0.2
12h:00	Enfriamiento	10	25	0.4
Total		90	161	4.62

Fuente: Elaboración propia

Tabla 12: Resultados de caudal de agua residual

Parámetros	Valor	Unidad
Caudal inicial	0.513	l/s
Caudal máximo	0.855	l/s
Caudal de diseño	44.3	m ³ /día

Fuente: Elaboración propia

4.10.2. Dimensionamiento del Canal de Entrada

Es la estructura hidráulica inicial por donde fluye el agua residual hacia una planta de tratamiento. Su función principal es conducir, regular y medir el caudal afluyente antes de su ingreso a las unidades de pretratamiento, como las rejillas o desarenadores.

El diseño de este canal de entrada se realizó con una configuración rectangular, se empleó el software HCANALES V3, los criterios de diseño preliminares se obtuvieron de (Tucunango, 2023; Valdiviezo, 2023).

Lugar:	Lácteos Fernández Cía. Ltda	Proyecto:	Canal de entrada
Tramo:		Revestimiento:	Hormigón de acabado liso

Datos:	
Caudal (Q):	0.00513 m ³ /s
Ancho de solera (b):	0.25 m
Talud (Z):	0
Rugosidad (n):	0.013
Pendiente (S):	0.005 m/m

Resultados:			
Tirante normal (y):	0.0392 m	Perímetro (p):	0.3284 m
Area hidráulica (A):	0.0098 m ²	Radio hidráulico (R):	0.0298 m
Espejo de agua (T):	0.2500 m	Velocidad (v):	0.5234 m/s
Número de Froude (F):	0.8439	Energía específica (E):	0.0532 m-Kg/Kg
Tipo de flujo:	Subcrítico		

Figura 15. Diseño del canal de entrada en el software hcanales V3

Fuente: Elaboración propia mediante el software hcanales V3.

La siguiente tabla presenta los valores del coeficiente de rugosidad de Manning utilizados para el cálculo hidráulico de canales revestidos, parámetro fundamental para estimar la velocidad y capacidad de conducción del flujo.

Tabla 13: Coeficiente de Manning para cálculo de canales

Canales revestidos	N	1/n
Hormigón, piezas prefabricadas, paredes rugosas	0.015	66.67
Hormigón, acabado con paleta, paredes lisas	0.013	76.92

Fuente: Elaboración propia con base en literatura técnica.

La tabla 10 muestra los criterios de diseño adoptados para canales rectangulares, considerando parámetros hidráulicos que garantizan un flujo adecuado y seguro dentro del sistema de conducción.

Tabla 14: Criterios de diseño para canales rectangulares

Parámetros	Valor o Rango	Unidades
Altura máxima de lámina de agua	0.3	m
Velocidad del flujo del canal	0.2 – 1	m/s
Borde libre (por encima del caudal punta al final del periodo de diseño)	0.3 – 0.4	m
Coefficiente de rugosidad Manning	0.014	Independiente del material de construcción

Fuente: Elaboración propia con base en literatura técnica.

Cálculo del Radio Hidráulico

El radio hidráulico se obtiene con la siguiente expresión.

$$R_H = \frac{b * h}{b + 2h}$$

Donde:

$R_H =$ Radio hidráulico (m)

$b =$ ancho del espejo de agua (m)

$h =$ altura del tirante normal (m)

Tenemos:

$$R_H = \frac{0.25m * 0.0392m}{0.25m + 2(0.0392m)}$$

$$R_H = 0.0298 \text{ m}$$

Cálculo de la Velocidad de Flujo

La velocidad de flujo se obtiene con:

$$v = \frac{1}{n} * R_H^{\frac{2}{3}} * S^{\frac{1}{2}}$$

Donde:

$v = \text{velocidad de flujo (m/s)}$

$n = \text{coeficiente de rugosidad de manning}$

$R_H = \text{radio hidraulico (m)}$

$S = \text{pendiente (m/m)}$

Tenemos:

$$v = \frac{1}{0.013} * 0.0298^{\frac{2}{3}} * 0.0005^{\frac{1}{2}}$$

$$v = 0.00885 \text{ m/s}$$

Área del Canal

$$A_c = b * h$$

Donde:

$A_c = \text{Área del canal (m}^2\text{)}$

$b = \text{Ancho del canal (m)}$

$h = \text{longitud del canal (m)}$

Tenemos:

$$A_c = 0.25\text{m} * 2\text{m}$$

$$A_c = 0.5m^2$$

Cálculo de Altura Efectiva

$$h = \frac{A_c}{b}$$

Donde:

h = *Altura efectiva*

A_c = *Área del canal en m²*

b = *base del canal; diseño ($b = 2h$)*

Tenemos:

$$h = \frac{A_c}{2h}$$

$$h = \sqrt{\frac{A_c}{2}}$$

$$h = \sqrt{\frac{0.5m}{2}}$$

$$h = 0.5m$$

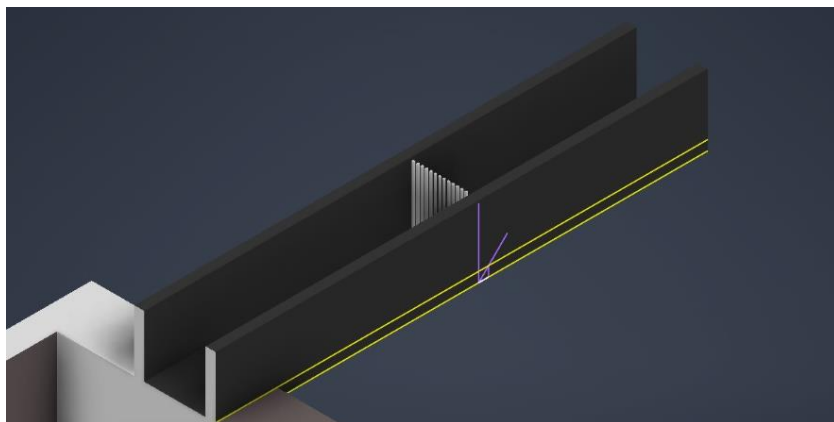


Figura 16. Diseño preliminar del canal de entrada

Fuente: *Elaboración propia*

4.10.3. Resultados Diseño Caudal de Entrada

Para un caudal de diseño de 7,38 m³/día el diseño del canal de entrada se realizó a través del software HCANALES v3, se obtuvo los siguientes resultados:

Tabla 15: Resultados del canal de entrada

Parámetros	Valor	Unidad
Ancho del canal	0.25	m
Altura del agua en el canal	0.0392	m
Radio hidráulico	0.0298	m
Velocidad del flujo	0.00885	m/s
Pendiente del canal	0.005	m/m
Área de la sección transversal	0.0098	m ²
Altura del canal	0.5	m

Fuente: *Elaboración propia*

4.10.4. Dimensionamiento del Desbaste (rejas)

Las rejas son estructuras físicas compuestas por barras metálicas paralelas, dispuestas a intervalos regulares, que se instalan en los canales de entrada de una planta de tratamiento de aguas residuales con el propósito de interceptar y remover sólidos gruesos y materiales flotantes. De acuerdo con el levantamiento de información, la empresa no genera gran cantidad de sólidos de mayor tamaño, por lo tanto, el diseño del cribado asume rejas finas. Los parámetros de diseño del desbaste de acuerdo con una limpieza manual o mecánica se demuestran en la tabla 16.

Tabla 16: Criterios hidráulicos y geométricos de diseño. Tomado de (Metcalf & Eddy, 2014).

Características	Limpieza Manual	Limpieza Mecánica	Unidad
-----------------	-----------------	-------------------	--------

Ancho de las barras	5 – 15	5 – 15	mm
Espesor de barras	5 – 10	5 – 10	mm
Profundidad de las barras	25 – 37.5	25 – 37.5	mm
Abertura o espaciamiento	25 – 50	15 – 75	mm
Pendiente con la vertical	60 – 45	0 – 60	grados
Velocidad de acercamiento	0.3 – 0.6	0.6 – 1.1	m/s
Perdida de energía permisible	150	150	mm

Fuente: Tomado de (Metcalf & Eddy, 2014).

Longitud de las Rejas

$$L_b = \frac{H_{mc}}{\text{sen}\theta}$$

Donde:

$L_b = \text{longitud de barras (m)}$

$H_{mc} = \text{Altura del canal (m)}$

$\theta = \text{ángulo de inclinación de las barras}$

Tenemos:

$$L_b = \frac{0.5 \text{ m}}{\text{sen}45}$$

$$L_b = 0.70 \text{ m}$$

Número de Barras

$$N_b = \frac{b}{e + s}$$

Donde:

$N_b = \text{número de barras}$

$b = \text{ancho del canal (m)}$

$S = \text{separación entre barras}$

$e = \text{espesor de las barras (m)}$

$$N_b = \frac{0.5 \text{ m}}{0.01 \text{ m} + 0.025 \text{ m}}$$

$$N_b = 14.28 \approx 14 \text{ barras}$$

4.10.5. Resultados Diseño del Desbaste

Considerando las condiciones de la planta enfriadora de leche cruda, se dimensionó un sistema de cribado de limpieza manual, debido a la intermitencia del caudal. El sistema consta de las siguientes características:

Tabla 17: Resultados del sistema de desbaste

Parámetros	Valor	Unidad
Longitud de rejas	0.70	<i>m</i>
Numero de barras	14	<i>u</i>
Espesor de barras	0.01	<i>m</i>
Separación entre barras	25	<i>mm</i>
Velocidad de aproximación	0.3	<i>m/s</i>
Pendiente con la vertical	45	°
Perdida de carga	150	Mm

Fuente: Elaboración propia

4.10.6. Dimensionamiento para la Trampa de Grasas y Aceites

Son unidades diseñadas para separar y retener aceites, grasas y otros materiales flotantes que se encuentran en las aguas residuales, su fundamento se basa en la reducción de la velocidad del flujo y el aprovechamiento de la menor densidad de las grasas y aceites, lo que permite su flotación y acumulación en la superficie, facilitando su remoción manual o mecánica.

Los criterios de diseño para la trampa de grasas y aceites se describen de acuerdo a la bibliografía de (Metcalf & Eddy, 2014).

Tabla 18: Criterios de diseño de trampas de grasas y aceites. Tomado y modificado de (Metcalf & Eddy, 2014).

Criterios de diseño	Valor	Unidad
Relación ancha/largo	1:4 – 1:18	-
Tiempo de retención	0.5 – 3	h
Profundidad	< 0.8	M
Velocidad ascendente mínima	4	mm/s
Ingreso	Codo de 90° diámetro mínimo de 75	mm
Parte inferior del codo de entrada	0.15 por debajo del nivel de líquido	m
Parte superior de la tubería de salida deberá tener una ventilación	No menor de 0.05	m
El espacio sobre el nivel del líquido	Mínimo 0.03	m
Salida	con diámetro mínimo de 75	mm
Pendiente	45 a 60	grados
Diferencia de nivel entre tubería de ingreso y tubería de salida	Mayor a 0.05	m
Diámetro de tuberías de entrada	Mínimo 50	mm
Parte inferior de la tubería de salida	No menos de 0.075 ni más de 0.15 del fondo	m
Diámetro de tuberías de salida	Mínimo 100	mm
Carga Hidráulica	1 – 2	m ³ /m ² *h

Cálculo del Área del Tanque

$$A_T = \frac{Q}{C_s}$$

Donde:

$A_T = \text{Área del tanque (m}^2\text{)}$

$Q = \text{caudal de diseño (m}^3\text{/h)}$

$C_s = \text{carga hidráulica (m}^3\text{/m}^2 \text{* h)}$

Tenemos:

$$A_T = \frac{18.47 \text{ m}^3\text{/h}}{2 \text{ m}^3\text{/m}^2 \text{* h}}$$

$$A_T = 9.24 \text{ m}^2$$

Cálculo del Ancho del Tanque

$$b = \sqrt{\frac{A}{4}}$$

Donde:

$b = \text{ancho del tanque (m)}$

$A = \text{área del tanque (m}^2\text{)}$

Tenemos:

$$b = \sqrt{\frac{9.24 \text{ m}^2}{4}}$$

$$b = 1.52 \text{ m}$$

Cálculo de la Longitud del Tanque

$$L = b * 4$$

Donde:

$L =$ largo del tanque (m)

$b =$ ancho del tanque (m)

Tenemos:

$$L = 1.52 \text{ m} * 4$$

$$L = 6.08 \text{ m}$$

Cálculo del Volumen del Tanque

$$V_T = b * L * h$$

Donde:

$V_T =$ volumen de la trampa de grasa (m^3)

$l =$ longitud (m)

$b =$ ancho (m)

$h =$ altura recomendada (m)

Tenemos:

$$V_T = 1.52 \text{ m} * 6.08 \text{ m} * 0.6 \text{ m}$$

$$V_T = 5.54 \text{ m}^3$$

Cálculo del Tiempo de Retención Hidráulico

$$TRH = \frac{V}{Q}$$

Donde:

$TRH = tiempo\ de\ retención\ hidráulico\ (h)$

$Q = Caudal\ máximo\ (m^3/h)$

$V = volumen\ (m^3)$

Tenemos:

$$TRH = \frac{5.54\ m^3}{18.47\ m^3/h}$$

$$TRH = 0.3\ h$$

$$TRH = 18\ min$$

4.10.7. Resultados Diseño de la Trampa de Grasas

El tratamiento para remoción de aceites y grasas fue establecido a partir de los criterios de diseño de (Metcalf & Eddy, 2014), los resultados a partir del dimensionamiento se detallan a continuación en la tabla 19.

Tabla 19: Resultados del sistema de trampa de grasas y aceites

Parámetros	Valor	Unidad
Área	9.24	m^2
Ancho	1.52	m
Longitud	6.08	m
Volumen	5.54	m^3
Tiempo de retención hidráulico	18	min
Profundidad	0.8	m
Carga hidráulica	2	$m^3/m^2 * h$

Fuente: Elaboración propia

4.10.8. Diseño del sistema de coagulación-Floculación

Caudal de diseño

$$Q = 0,513 \text{ L/s} = 0,000513 \text{ m}^3/\text{s}$$

Caudal diario:

$$Q_d = 0,000513 \times 86400 = 44,3 \text{ m}^3/\text{día}$$

Este caudal es típico de una planta láctea pequeña–mediana, con generación de efluentes ricos en: Sólidos suspendidos, Grasas y aceites, Proteínas, Materia orgánica (alta DQO y DBO)

Justificación del proceso

La coagulación–floculación se incorpora como tratamiento primario avanzado para:

- Remoción de sólidos suspendidos y coloides
- Reducción de grasas, proteínas y turbidez
- Disminución de DQO y DBO
- Protección de procesos posteriores (sedimentación, humedal, reactor biológico)

A partir de los ensayos experimentales realizados mediante pruebas de jarras, se determinó que los mejores resultados de remoción de turbidez y formación de flóculos estables se obtuvieron en los ensayos 1 y 3, particularmente en los vasos donde se aplicó policloruro de aluminio (PAC) combinado con polímero aniónico. En estos tratamientos se lograron reducciones significativas de turbidez, alcanzando valores finales bajos y una mejor sedimentación de sólidos en comparación con el uso individual de sulfato de aluminio u otras combinaciones.

Adicionalmente, durante estos ensayos se observó que el uso de PAC presentó menor variación de pH y menor consumo de alcalinidad, lo cual reduce la necesidad de correcciones químicas adicionales. Asimismo, se evidenció una menor producción de lodos y mejor estabilidad de flóculos, facilitando la operación del sistema y disminuyendo costos de manejo de residuos.

Por estas razones, el diseño del sistema de tratamiento adopta el criterio de coagulación–floculación mediante PAC como coagulante principal y polímero aniónico como coadyuvante, ya que esta combinación demostró experimentalmente ser la alternativa más eficiente y operativamente estable para el tratamiento del efluente generado en la planta.

Parámetros de diseño adoptados

Tabla 20. Parámetros de diseño del sistema de coagulación-Floculación

Parámetro	Valor adoptado
Coagulante	Policloruro de aluminio (PAC)
Dosis PAC	40 mg/L (<i>ajustable por jar test</i>)
Coadyuvante	Polímero aniónico
Dosis polímero	1,0 mg/L
pH de operación	6,0 – 7,0
Temperatura	15–25 °C

Fuente: Elaboración propia

4.10.9. Diseño del sistema de coagulación

Tiempo de mezcla rápida

Valor típico:

$$t_c = 30 \text{ s}$$

Volumen del tanque de coagulación

$$V_c = Q \times t_c$$

$$V_c = 0,000513 \times 30 = 0,0154 \text{ m}^3$$

Volumen de diseño adoptado:

$$V_c = 0,02 \text{ m}^3 \text{ (20 L)}$$

Gradiente de velocidad (G)

Para coagulación:

$$G = 700\text{--}1000 \text{ s}^{-1}$$

Se adopta:

$$G = 800 \text{ s}^{-1}$$

4.10.10. Diseño del sistema de floculación

Tiempo de floculación

Para aguas residuales lácteas:

$$t_f = 20\text{--}30 \text{ min}$$

Se adopta:

$$t_f = 25 \text{ min} = 1500 \text{ s}$$

Volumen del tanque de floculación

$$V_f = Q \times t_f$$

Gradiente de velocidad (G)

Floculación lenta:

$$G = 20\text{--}60 \text{ s}^{-1}$$

Diseño por etapas:

Tabla 21. Parámetros del sistema de floculación

Cámara	G (s⁻¹)
Floc 1	60
Floc 2	40
Floc 3	25

Dosificación de reactivos

PAC

$$\begin{aligned} \text{Carga PAC} &= Q_d \times \text{dosis} \\ &= 44,3 \times 40 = 1772 \text{ g/día} \approx 1,77 \text{ kg/día} \end{aligned}$$

Polímero aniónico

$$= 44,3 \times 1,0 = 44,3 \text{ g/día}$$

4.10.11. Sistema de sedimentación (posterior)

Se recomienda un sedimentador primario posterior con:

- Tiempo de retención: 1,5 – 2 h
- Velocidad ascensional: 0,8 – 1,2 m³/m²·h
- Remoción esperada:
 - SST: 70–85 %
 - DQO: 40–60 %
 - Grasas: >80 %

4.10.12. Producción estimada de lodos

- Lodos químicos ricos en proteínas y grasas

- Producción estimada:
 $0,8-1,2 \text{ kg SST/m}^3$
- Requiere:
 - Espesamiento
 - Lecho de secado

4.10.13. Esquema del sistema propuesto

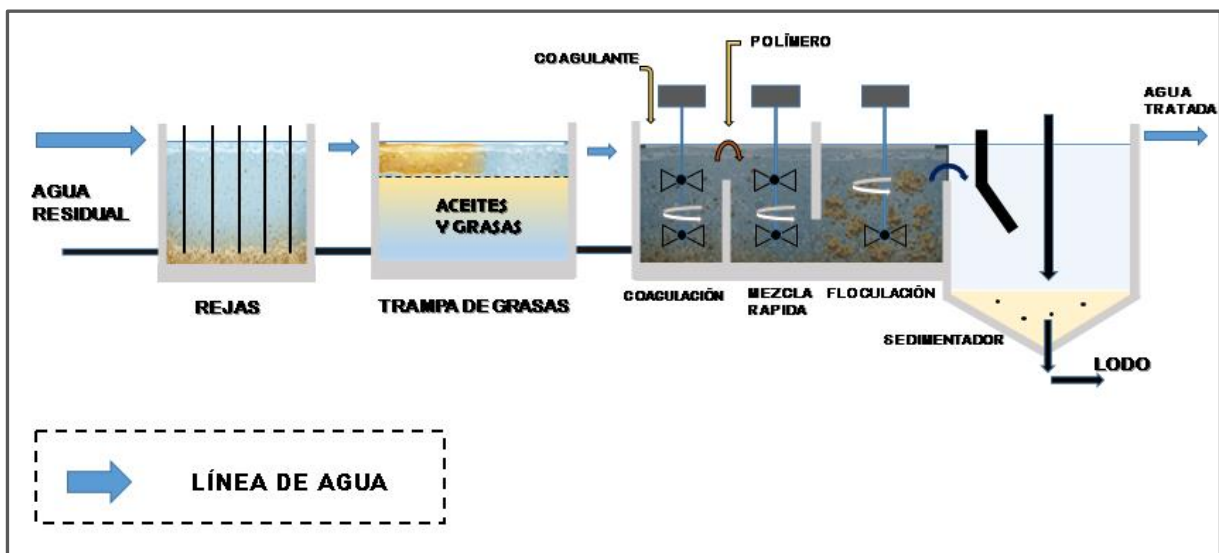


Figura 17. Esquema del sistema de tratamiento planteado

Fuente: Elaboración propia

4.10.14. Cálculo de potencia de mezcladores

La potencia de los mezcladores fue calculada en función del gradiente de velocidad y el volumen de cada unidad, obteniéndose valores de baja demanda energética, acordes con el caudal tratado. El sistema presenta eficiencia hidráulica y bajo consumo energético, lo que lo hace adecuado para aplicaciones en plantas de tratamiento de aguas residuales de pequeña escala.

Sistema de coagulación–floculación

Caudal de diseño: 0,513 L/s (0,000513 m³/s)

Fundamento teórico

La potencia requerida para un mezclador hidráulico se calcula mediante la ecuación clásica:

$$P = \mu \cdot G^2 \cdot V$$

Donde:

- P = potencia requerida (W)
- μ = viscosidad dinámica del agua (N·s/m²)
- G = gradiente de velocidad (s⁻¹)
- V = volumen del tanque (m³)

Para agua a 20 °C:

$$\mu = 1,0 \times 10^{-3} \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$$

Potencia del mezclador rápido (coagulación)

Parámetros de diseño

- Volumen del tanque de coagulación:

$$V_c = 0,02 \text{ m}^3$$

- Gradiente de velocidad:

$$G_c = 800 \text{ s}^{-1}$$

4.10.15. Cálculo de potencia

$$P_c = (1,0 \times 10^{-3}) \cdot (800)^2 \cdot 0,02$$

$$P_c = 12,8 \text{ W}$$

Potencia de diseño

Considerando:

- pérdidas mecánicas,
- eficiencia del motor ($\approx 70\%$),
- factor de seguridad,

Potencia recomendada del motor:

$$P_{c,motor} = 25 \text{ W } (\approx 0,03 \text{ HP})$$

Potencia del sistema de floculación

El tanque de floculación fue diseñado con 3 cámaras en serie, con gradiente de velocidad decreciente.

Volumen total:

$$V_f = 0,80 \text{ m}^3$$

Se distribuye en 3 cámaras:

$$V_{f1} = V_{f2} = V_{f3} = 0,27 \text{ m}^3$$

Potencia por cámara de floculación

Cámara 1 (Floculación rápida)

- $G_1 = 60 \text{ s}^{-1}$
- $V_1 = 0,27 \text{ m}^3$

$$P_1 = (1,0 \times 10^{-3}) \cdot (60)^2 \cdot 0,27$$

$$P_1 = 0,97 \text{ W}$$

Cámara 2 (Floculación intermedia)

- $G_2 = 40 \text{ s}^{-1}$

$$P_2 = (1,0 \times 10^{-3}) \cdot (40)^2 \cdot 0,27$$

$$P_2 = 0,43 \text{ W}$$

Cámara 3 (Floculación lenta)

- $G_3 = 25 \text{ s}^{-1}$

$$P_3 = (1,0 \times 10^{-3}) \cdot (25)^2 \cdot 0,27$$

$$P_3 = 0,17 \text{ W}$$

Potencia total del sistema de floculación

$$P_{f,\text{total}} = P_1 + P_2 + P_3$$

$$P_{f,\text{total}} = 1,57 \text{ W}$$

Potencia de diseño recomendada

Aplicando eficiencia del sistema y factor de seguridad:

$$P_{f,\text{motor}} = 10\text{--}15 \text{ W } (\approx 0,02 \text{ HP})$$

Puede emplearse:

- Un solo eje con paletas y control de velocidad, o
- Tres mezcladores lentos independientes de muy baja potencia.

Resumen de potencias requeridas

Tabla 22. Resultados de la potencia requerida

Proceso	Potencia calculada (W)	Potencia recomendada
Coagulación	12,8 W	25 W (0,03 HP)
Floculación	1,57 W	10–15 W (0,02 HP)

Fuente: Elaboración Propia

Observaciones técnicas importantes

- Las potencias calculadas son muy bajas debido al pequeño caudal.
- En la práctica, los motores comerciales más pequeños suelen ser:
 - 0,06 HP
 - 0,125 HP
- Se recomienda:
 - Variador de velocidad (VFD)
 - Ejes y paletas de baja velocidad
 - Material anticorrosivo (acero inoxidable o PVC)

4.10.16. Dimensionamiento de diámetro y velocidad de paletas

El dimensionamiento de los impulsores se realizó considerando relaciones geométricas estándar y velocidades periféricas recomendadas para procesos de coagulación y floculación. Las velocidades de rotación obtenidas garantizan gradientes de velocidad adecuados para la formación de flóculos estables, sin inducir su ruptura, optimizando la eficiencia del proceso.

Criterios de diseño adoptados

Tipo de mezcladores

- Coagulación: agitador mecánico de alta velocidad (mezcla rápida)
- Floculación: agitadores de paletas de baja velocidad (mezcla lenta)

Relaciones geométricas recomendadas

Para tanques cuadrados o circulares:

- Diámetro del impulsor:

$$D = (0,30-0,50) T$$

donde:

- D = diámetro del impulsor (m)
- T = ancho o diámetro del tanque (m)

Se adopta:

- Coagulación: $D = 0,40T$
- Floculación: $D = 0,45T$

Mezclador de coagulación (mezcla rápida)

Geometría del tanque

Se adopta un tanque compacto:

- Volumen: $V_c = 0,02 m^3$
- Dimensiones propuestas:
 - Largo = 0,30 m
 - Ancho = 0,30 m
 - Altura útil = 0,25 m

Diámetro del impulsor

$$D_c = 0,40 \times 0,30 = 0,12 m$$

Velocidad de rotación

Para mezcla rápida, velocidad periférica típica:

$$v = 2-4 \text{ m/s}$$

Se adopta:

$$v = 3 \text{ m/s}$$

Relación entre velocidad y rpm:

$$v = \frac{\pi DN}{60}$$

Despejando N :

$$N = \frac{60v}{\pi D}$$

$$N_c = \frac{60 \times 3}{\pi \times 0,12}$$

$$N_c = 477 \text{ rpm}$$

Verificación con gradiente de velocidad

El valor obtenido es coherente con:

- $G \approx 800 \text{ s}^{-1}$
- Potencia calculada: 12,8 W

Mezcladores de floculación (mezcla lenta)

Geometría del tanque de floculación

Volumen total:

$$V_f = 0,80 \text{ m}^3$$

Dividido en 3 cámaras iguales:

- Volumen por cámara:

$$V_i = 0,27 \text{ m}^3$$

Dimensiones adoptadas por cámara:

- Largo = 0,60 m
- Ancho = 0,60 m
- Altura útil = 0,75 m

Díámetro de las paletas

$$D_f = 0,45 \times 0,60 = 0,27 \text{ m}$$

Velocidad de rotación por cámara

Para floculación, velocidades periféricas típicas:

$$v = 0,10\text{--}0,30 \text{ m/s}$$

Cámara 1 ($G = 60 \text{ s}^{-1}$)

$$v_1 = 0,25 \text{ m/s}$$

$$N_1 = \frac{60 \times 0,25}{\pi \times 0,27}$$

$$N_1 = 17,7 \text{ rpm} \approx 18 \text{ rpm}$$

Cámara 2 ($G = 40 \text{ s}^{-1}$)

$$v_2 = 0,18 \text{ m/s}$$

$$N_2 = \frac{60 \times 0,18}{\pi \times 0,27}$$

$$N_2 = 12,7 \text{ rpm} \approx 13 \text{ rpm}$$

Cámara 3 ($G = 25 \text{ s}^{-1}$)

$$v_3 = 0,12 \text{ m/s}$$

$$N_3 = \frac{60 \times 0,12}{\pi \times 0,27}$$

$$N_3 = 8,5 \text{ rpm} \approx 9 \text{ rpm}$$

4.10.17. Resumen del dimensionamiento del diámetro y velocidad de paletas

Tabla 23. Resultados de diámetro y velocidad de paletas

Proceso	Diámetro paleta (m)	Velocidad (rpm)
Coagulación	0,12	480
Floculación – Cámara 10,27		18
Floculación – Cámara 20,27		13
Floculación – Cámara 30,27		9

Fuente: Elaboración propia

Recomendaciones constructivas

- Tipo de paleta:
 - Coagulación → impulsor tipo turbina o hélice
 - Floculación → paletas planas o tipo marco
- Material:
 - Acero inoxidable AISI 304/316 o PVC reforzado
- Separación al fondo:
 - $\geq 0,15 \text{ m}$
- Uso de variador de velocidad (VFD) recomendado

4.10.18. Dimensionamiento del Tanque de Sedimentación

Son estructuras diseñadas para remover partículas sólidas suspendidas del agua residual mediante la acción de la gravedad. Se utilizan en diversas etapas del tratamiento para permitir que los sólidos más densos se asienten en el fondo del tanque, formando un lodo, mientras que el agua clarificada fluye por la parte superior hacia las etapas posteriores del proceso.

De acuerdo con Metcalf & Eddy (2014), los criterios de diseño para el tanque de sedimentación se demuestran en la tabla 20.

Tabla 24: Criterios de diseño para el tanque de sedimentación.

Parámetros	Intervalo	Unidad
Carga Superficial	20 – 40	m ³ /m ² *día
Tiempo de retención	0.5 – 0.3	h
Profundidad	1.5 – 3	m
Pendiente de solera	6.25 – 16	m/m
Velocidad de flujo	0.3 – 0.9	m/s

Fuente: Tomado de (Metcalf & Eddy, 2014)

Cálculo del Área Superficial del Tanque Sedimentador

$$A_{TS} = \frac{Q_d}{C_s}$$

Donde:

A_{TS} = área superficial (m²)

Q_d = caudal de diseño (m³/día)

$C_s = \text{carga superficial (m}^3/\text{m}^2 * \text{día)}$

Tenemos:

$$A_{TS} = \frac{44.3 \text{ m}^3/\text{día}}{40 \text{ m}^3/\text{m}^2 * \text{día}}$$

$$A_{TS} = 1.11 \text{ m}^2$$

4.10.19. Cálculo del Diámetro del Tanque Sedimentador

$$\phi_{TS} = \sqrt{\frac{4 * A_{TS}}{\pi}}$$

Donde:

$\phi_{TS} = \text{diámetro del tanque sedimentador (m)}$

$A_{TS} = \text{área superficial del tanque sedimentador (m}^2\text{)}$

Tenemos:

$$\phi_{TS} = \sqrt{\frac{4 * A_{TS}}{\pi}}$$

$$\phi_{TS} = \sqrt{\frac{4 * 1.11 \text{ m}^2}{\pi}}$$

$$\phi_{TS} = 1.19 \text{ m}$$

Volumen del Tanque Sedimentador

$$V_{TS} = \pi * r^2 * H_{TS}$$

Donde:

$V_{TS} = \text{volumen del tanque sedimentador (m}^3\text{)}$

$r = \text{radio del tanque sedimentador (m)}$

H_{TS} = altura del tanque sedimentador (m)

Tenemos:

$$V_{TS} = \pi * 0.60m^2 * 1.5 m$$

$$V_{TS} = 1.70 m^3$$

Carga Sobre el Vertedero de Salida

$$C = \frac{Q_D}{\pi * A_{TS}}$$

Donde:

C = carga sobre el vertedero (m^3/m^2 día)

Q_D = caudal de diseño (m^3/h)

A_{TS} = área superficial del tanque sedimentador (m^2)

Tenemos:

$$C = \frac{18.47 m^3/h}{\pi * 1.11 m^2}$$

$$C = 5.29 \frac{m^3}{m^2 \text{ día}}$$

Cálculo del Tiempo de Retención Hidráulica

$$TRH = \frac{V_{TS}}{Q_D}$$

Donde:

TRH = tiempo de retención hidráulico (h)

Q_D = caudal de diseño (m^3/h)

V_{TS} = volumen del tanque sedimentador (m^3)

$$TRH = \frac{1.70 \text{ m}^3}{18.47 \text{ m}^3/\text{h}}$$

$$TRH = 0.092 \text{ h}$$

$$TRH = 5.5 \text{ min}$$

4.10.20. Resultados Diseño Tanque de Sedimentación

Se ha proyectado un tanque de sedimentación cuya finalidad es permitir la deposición de los sólidos presentes en el efluente mediante el efecto de la gravedad. Las especificaciones técnicas de esta unidad se detallan en la Tabla 21.

Tabla 25: Resultados del sistema del tanque de sedimentación

Parámetros	Valor	Unidad
Área	1.11	m^2
Diámetro	1.19	m
Radio	0.60	m
Volumen	1.70	m^3
Tiempo de retención hidráulico	5.5	min
Profundidad	1.5	m
Carga sobre el vertedero	5.29	$\text{m}^3/\text{m}^2 * \text{día}$

Fuente: Elaboración propia

Eficiencia en el diseño del sedimentador primario

De acuerdo con los criterios técnicos de Metcalf & Eddy (2014), las eficiencias típicas esperadas para esta infraestructura se presentan en la Tabla 22:

Tabla 26: Eficiencia del sistema sedimentador

Tipo de elemento	Parámetro removido	Eficiencia típica de remoción
Sedimentador	Sólidos Suspendidos Totales	50% a 70%
	Demanda Bioquímica de Oxígeno	25% a 40%
	Demanda Química de Oxígeno	20% a 35%
	Grasas y Aceites	50% a 70%
	Sólidos sedimentables	80% a 90%

Fuente: Tomado y modificado de (Metcalf & Eddy, 2014)

4.10.21. Evaluación del sistema combinado del tratamiento

Al evaluar el sistema como una sola línea de tratamiento (Desbaste + Trampa de Grasas + Sedimentación), los valores de eficiencia incrementan mediante la asociación de los procesos físicos, como se detalla a continuación:

Tabla 27. Eficiencia proyectada del sistema combinado

Tipo de elemento	Parámetro removido	Eficiencia típica de remoción
Desbaste	Sólidos suspendidos gruesos	28%
	Sólidos Suspendidos Totales	85%
Trampa de Grasas y Aceites	Demanda Bioquímica de Oxígeno	65%
	Demanda Química de Oxígeno	65%
Coagulación-Floculación	Turbidez	98%
	Grasas y Aceites	90%
Sedimentador	Sólidos sedimentables	90%

Fuente: Tomado y modificado de (Metcalf & Eddy, 2014)

4.11. Discusión

4.11.1. Caracterización del agua residual

Al comparar la caracterización inicial con otros estudios del sector, se observa que la DQO de 2341 mg/L obtenida en este trabajo es similar a lo obtenido por Jaramillo (2020) quien indica 2302 mg/L en una industria láctea, pero es superior a los 2180 mg/L reportados por Gaibor (2014) en la planta de lácteos El Salinerito (Salinas-Guaranda). Sin embargo, este valor es inferior a los 2895 mg/L reportados por Borja (2018) en una industria láctea de Puyo, aunque considerablemente mayor a los 312 mg/L indicados por Landi (2018) en una industria ubicada en el cantón Quito.

En cuanto a la DBO₅, nuestro hallazgo de 880 mg/L es significativamente inferior a los 3400 mg/L reportados por Gaibor (2014) y los 4915 mg/L de Borja (2018). Esta diferencia sugiere que los efluentes de este estudio presentan una menor carga orgánica biodegradable en comparación con los otros autores, lo que indicaría un aprovechamiento más eficiente de los subproductos o una menor pérdida de materia prima en las aguas de lavado.

Por otro lado, la turbidez de 1440 NTU registrada en este estudio supera el valor de Gaibor (2014), quien reportó 644 NTU en una planta similar; no obstante, es inferior a los 2131 NTU reportados por Chuiza-Rojas (2019). Asimismo, se encuentran similitudes tanto en la turbidez como en el pH con lo reportado por Reddy (2024) un estudio a nivel internacional. Esta variabilidad en la carga de sólidos suspendidos justifica la búsqueda de una dosis optimizada de PAC (Policloruro de Aluminio) para lograr la clarificación eficiente del efluente bajo las condiciones específicas de "Lácteos Fernández".

4.11.2. Evaluación por Unidades de Tratamiento

El sistema de desbaste mediante rejillas finas de limpieza manual asume una eficiencia del 85% en la remoción de sólidos suspendidos gruesos de acuerdo con lo indicado por Metcalf & Eddy (2014). Aunque esta unidad no reduce significativamente la carga orgánica soluble, su función es importante para proteger la integridad mecánica de las fases posteriores y evitar la acumulación de materiales de tamaño considerable que puedan obstruir los conductos.

En cuanto a la trampa de grasas y aceites, unidad vital para el sector lácteo, se ha proyectado una eficiencia moderada del 60%. Bajo este criterio, propuesto por Metcalf & Eddy (2014), la concentración de grasas disminuiría hasta alcanzar aproximadamente 1.6 mg/L, valor que se encuentra significativamente por debajo de los límites máximos permitidos por la normativa ambiental ecuatoriana. Esta remoción es fundamental, ya que el exceso de grasas suele inhibir

los procesos biológicos posteriores al crear capas impermeables que impiden la transferencia de oxígeno.

Por último, el sedimentador primario actúa como la unidad principal de remoción de carga física. Según la caracterización inicial, se estima una remoción del 70% de los sólidos totales, logrando reducir su concentración hasta 164.1 mg/L. Como se observa en la Tabla 25, el sedimentador aporta una reducción de la DQO y DBO₅ (entre el 20% y 40%), al precipitar la materia orgánica que se encuentra ligada a los sólidos sedimentables.

4.11.3. Análisis de eficiencia frente a contaminantes biológicos

A pesar de que el sistema combinado reduce la carga de DBO₅ y DQO en un 65%, y los SST a niveles cercanos a los 100 mg/L, los valores finales de carga orgánica todavía superan los límites estrictos del Acuerdo Ministerial 097-A.

Esta discusión permite concluir que el tratamiento físico propuesto es altamente efectivo para la remoción de contaminantes físicos (sólidos y grasas), cumpliendo con la normativa en esos apartados. Sin embargo, debido a la naturaleza soluble de gran parte de la lactosa y proteínas presentes en el efluente de la industria láctea, el tratamiento físico es insuficiente para alcanzar los estándares de vertido en términos de DBO₅ y DQO. Por lo tanto, se confirma la necesidad técnica de implementar un tratamiento secundario (biológico) que complemente la infraestructura diseñada y garantice el cumplimiento total de la legislación ambiental vigente.

4.11.4. Análisis de Tratamiento Óptimo de los ensayos

El aumento constante de la turbidez al final de las pruebas muestra que los contaminantes presentes en el efluente lácteo no requieren de la adición de polímeros de alta densidad de carga como el POLIDADMAC para su adecuado tratamiento. Por el contrario, la introducción de coadyuvantes complejos en este tipo de aguas residuales puede hacer que las partículas se vuelvan a mezclar con el agua en lugar de sedimentarse disminuyendo la eficiencia de la

clarificación. Este comportamiento se alinea con lo expuesto por Buenaño Dávalos (2015), quien señala que en aguas residuales lácteas, el PAC es capaz de desestabilizar las micelas de grasa y proteína de manera integral.

Para el diseño de la planta de tratamiento, se concluye que la opción más viable y económica es el uso exclusivo de PAC (Policloruro de Aluminio) en una dosis óptima de 15 mg/L. Esta alternativa no solo simplifica la operación del sistema, sino que garantiza una remoción de turbidez superior al 98%, entregando un efluente con valores aproximados de 16.5 NTU. Lo anterior justifica técnica y económicamente prescindir de coadyuvantes adicionales, asegurando un proceso eficiente y de menor costo operativo para la empresa. Sin embargo, se recomienda realizar otros estudios con biocogulantes (de naturaleza vegetal) pues han demostrado una mejor eficiencia en comparación al PAC (Jaramillo, 2020).

En síntesis, los resultados obtenidos en la caracterización del efluente, junto con los ensayos experimentales y el análisis del desempeño de las unidades propuestas, demuestran que el tratamiento físico basado en coagulación–floculación y sedimentación permite una remoción eficiente de sólidos suspendidos, grasas y turbidez presentes en el agua residual generada por la planta enfriadora de leche. Los ensayos realizados permitieron identificar al policloruro de aluminio (PAC) como el coagulante más eficiente y económicamente viable, estableciendo criterios técnicos claros para el diseño del sistema propuesto. No obstante, debido a la presencia de materia orgánica soluble propia de los efluentes lácteos, se confirma la necesidad de complementar el tratamiento con procesos biológicos que aseguren el cumplimiento total de la normativa ambiental vigente. En conjunto, el estudio proporciona bases técnicas sólidas para el diseño e implementación de un sistema de tratamiento eficiente, adaptable y operativamente viable para la empresa evaluada.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- El análisis fisicoquímico del agua residual proveniente de la empresa “Lácteos Fernández Cía. Ltda.” reveló una carga orgánica y física elevada, con valores promedios por encima de los límites establecidos en el Acuerdo Ministerial 097-A. Esta caracterización fue fundamental para determinar con precisión el grado de contaminación y constituyó un insumo esencial para el diseño de un sistema de tratamiento acorde a las condiciones reales del efluente.
- El índice de biodegradabilidad calculado ($DBO/DQO=0.3759$) indica que el efluente es moderadamente biodegradable. Esto demuestra que el efluente residual generado en el proceso de enfriamiento y acopio de leche cruda es apta para un tratamiento biológico convencional lo cual refuerza la necesidad de complementar el sistema físico con un tratamiento secundario.
- Los ensayos de Jar Test demostraron que el policloruro de aluminio (PAC) fue el coagulante más eficiente en la remoción de turbidez, logrando además una mayor estabilidad del pH, lo cual es fundamental para evitar afectaciones a procesos posteriores.
- La incorporación de coadyuvantes (polímero aniónico y polidadmac) favoreció la formación de flóculos más compactos y sedimentables; sin embargo, su efectividad estuvo directamente relacionada con la dosis aplicada, lo que resalta la importancia del control operativo.
- El diseño del sistema de coagulación-floculación, basado en un caudal de 0,513 L/s, cumple con los criterios hidráulicos y operativos recomendados para aguas residuales lácteas, garantizando tiempos de retención adecuados y gradientes de velocidad compatibles con la formación de flóculos estables.

- Los cálculos de potencia y dimensionamiento de los mezcladores evidencian que el sistema propuesto presenta bajo consumo energético, lo que lo hace técnica y económicamente viable para su implementación en plantas de tratamiento de pequeña escala.
- El sistema diseñado constituye una etapa primaria avanzada eficaz, capaz de reducir significativamente sólidos suspendidos, turbidez y parte de la carga orgánica, mejorando la eficiencia global del tratamiento y protegiendo las unidades secundarias.
- Se concluye que el uso exclusivo de PAC en una dosis de 15 mg/L es la alternativa técnica más viable para el diseño de la planta. Este tratamiento garantiza una remoción de turbidez superior al 98%, alcanzando valores óptimos de 16.5 NTU. Al prescindir de coadyuvantes adicionales, se simplifica la operación del sistema y se reducen significativamente los costos por adquisición de insumos químicos.

5.2. Recomendaciones

- Se recomienda complementar el sistema de tratamiento físico con un filtro percolador natural, elaborado con materiales orgánicos disponibles localmente como bagazo de caña, cascara de banano, piedra pómez o carbón activado vegetal. Este tipo de biofiltros permite una remoción efectiva de materia orgánica biodegradable y sólidos finos. Su bajo costo, facilidad de construcción y mantenimiento lo convierten en una solución ambientalmente adecuada para el contexto rural de la empresa “Lácteos Fernández Cía. Ltda.” Favoreciendo el cumplimiento de los parámetros establecidos en el Acuerdo Ministerial 097-A y mejorar la calidad del efluente antes del vertido final.
- Se recomienda implementar el sistema de coagulación–floculación propuesto como etapa previa al tratamiento biológico, con el fin de optimizar la remoción de sólidos y materia orgánica antes de procesos secundarios.

- Se recomienda fortalecer la capacitación básica sobre el impacto de los vertidos no tratados para ayudar a contribuir a una mejor operación del sistema y responsabilidad ambiental de la empresa.
- Se recomienda realizar ensayos periódicos de Jar Test para ajustar las dosis de PAC y polímero, considerando posibles variaciones en la calidad del agua residual asociadas a cambios en la operación de la planta.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Armijo, J., Azogue, H., Barragán, S., & Freire, A. (2021). Biotreatment of Wastewater in the Dairy Industry. *Journal of Agro-Industry Sciences*, 3(1), 21–26. <https://doi.org/10.17268/jais.2021.003>
- Asensi, E., Alemany, E., Duque-Sarango, P., & Aguado, D. (2019). Assessment and modelling of the effect of precipitated ferric chloride addition on the activated sludge settling properties. *Chemical Engineering Research and Design*, 150, 14–25. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2019.07.018>
- Becerra-Moreno, D., Rubio-Gomez, Y., Ramírez-Ríos, L. F., Barajas-Solano, A. F., & Machuca Martínez, F. (2021). Procesos Avanzados De Oxidación Basados En Ozono Como Alternativa De Tratamiento Para Lixiviados De Rellenos Sanitarios. *Ciencia En Desarrollo*, 12(2). <https://doi.org/10.19053/01217488.v12.n2.2021.12503>
- Beltrán, D., Lora, F., & Ramlho, R. (2021). *Tratamiento de Aguas Residuales* (REVERTE S.A, Ed.; 1st ed.). Academic Press. https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=T9MfEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR5&dq=aguas+residuales+&ots=3jMUjk7nrg&sig=8fHjzw2KAJ7iD82ayXjs_4fNBO8#v=onepage&q=aguas residuales&f=false
- Borja Mayorga, D. F., Chuiza Rojas, M. R., & Andrade Avalos, M. L. (2021). Clarification of wastewater from the dairy industry based on prickly pear (*Opuntia ficus indica*) as a natural coagulant. *ConcienciaDigital*, 4(3.1), 177–189. <https://doi.org/10.33262/concienciadigital.v4i3.1.1821>
- Buenaño Dávalos, M. G. (2015). *Propuesta de una planta de tratamiento de aguas residuales de una empresa envasadora de leche del Cantón Rumiñahui, para que cumpla con la norma técnica ambiental (T.U.L.A.S)* [Proyecto previo a la obtención del título de

Tecnóloga en Agua y Saneamiento Ambiental, Escuela Politécnica Nacional]. Repositorio Digital EPN. <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/10534/1/CD-6234.pdf>

Camacho, A., & Bryan, M. (2020). *Efecto de Ceniza de Cacao Theobroma Cacao, en la Remoción de Plomo y Cadmio, caso: Río Llactun - Ancash - 2021* [Universidad César Vallejo].

http://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/47102/Gutierrez_RS-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Carillo, J., Vera, J., & Loor, J. (2022). Diseño de un Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente para el Tratamiento de Aguas Residuales. *Revista Científica INGENIAR*, 5(10), 2–16.

Carpio, M., Ancco, M., Castro, A., Loza, R., & Jimenez, H. (2021). Aguas Residuales de Industria Láctea como Alternativa Sostenible para Aumentar la Productividad del Maíz en Perú. *Revista de Investigaciones Altoandinas - Journal of High Andean Research*, 23(1), 26–36. <https://doi.org/10.18271/ria.2021.229>

Chariguaman Coello, L. A., Gómez Machado, L. K., Guerrero Naranjo, L. E., & Moya Bayas, R. B. (2024). Tratamiento de Aguas Residuales Generadas en una Planta Procesadora de Lácteos en la Amazonia Ecuatoriana. *Reincisol.*, 3(6), 2311–2331. [https://doi.org/10.59282/reincisol.V3\(6\)2311-2331](https://doi.org/10.59282/reincisol.V3(6)2311-2331)

Chuiza-Rojas, M., Calderón, S. H., Vargas-Escobar, J. A., Borja-Mayorga, D. F., & Rennola-Alarcón, L. (2019). *Clarificación de un agua residual de una industria láctea mediante coagulación con Tuna (Opuntia ficus-indica)*. *Ciencia e Ingeniería*, 40(3), 245–251. <https://www.redalyc.org/journal/5075/507567854003/>

CONALECHE. (2024). *Informe del Sector Lácteo Ecuatoriano*. Informe Del Sector Lácteo Ecuatoriano. Quito, Ecuador.

- Contreras, E. (2020). *Industria Láctea* (Vol. 21, Issue 1). <http://journal.um-surabaya.ac.id/index.php/JKM/article/view/2203>
- Cuvi, K. (2017). *Determinación de la Factibilidad de Utilizar Sistemas de Lodos Anctivados para la Depuración de Aguas Residuales Industriales Procedentes de una Fábrica de Lácteos y una de Confites*. Quito DM. [Universidad Politécnica Salesiana Sede Quito]. <http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/5081/1/UPS-CYT00109.pdf>
- Daviran, J. (2021). *Remoción de Turbiedad y Sólidos Suspendidos Totales con la Utilización de la Cáscara de Cacao (Theobroma cacao) como Coagulante Natural en las Aguas del Río Chillón* [Universidad Nacional de Callao]. <http://hdl.handle.net/20.500.12952/6368>
- Deloya, A. (2006). Métodos de Análisis Físicos y Espectrofométricos para el Análisis de Aguas Residuales. *Tecnología En Marcha*, 19(2), 31–40. https://revistas.tec.ac.cr/index.php/tec_marcha/article/view/30
- Duque, P. (2023). Modelamiento del Tratamiento Biológico: Análisis con un Ensayo Experimental en un Reactor Discontinuo Aeróbico. *Brazilian Journal Of Animal And Enviromental Research*, 6(2), 1097–1107.
- Duque-Sarango, P., & Hernández, B. (2020). Estudio integral del recurso hídrico de la microcuenca del rio guarango, cuenca – ecuador. *Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologias de Informação*, 30, 240–252. <https://search.proquest.com/docview/2404399354?accountid=32861>.
- Duque-Sarango, P., & Pinos, V. (2022). *Modeling of the Guangarcucho Municipal Wastewater Treatment Plant Using WEST, Cuenca-Ecuador*. 33–46. https://doi.org/10.1007/978-3-030-93718-8_4
- Duque-Sarango, P., & Zagal-Andrade, C. (2023). Análisis de la eficiencia de una planta de experimentación de humedal subsuperficial de flujo vertical para el tratamiento de aguas

- residuales: Efficiency analysis of a vertical flow subsurface wetland experiment plant for wastewater treatment. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research*, 6(2), 1625–1634. <https://doi.org/10.34188/BJAERV6N2-054>
- Duque-Sarango, P., Cárdenas, C., Crespo, B., Mera-Parra, C., & Cedillo, S. (2025). Smart Waters: Harnessing Machine Learning to Predict Water Quality in a Tropical Andean Watershed. *Lecture Notes in Networks and Systems*, 1331 LNNS, 261–270. https://doi.org/10.1007/978-3-031-87065-1_24/TABLES/5
- Duque-Sarango, P., Delgado-Armijos, N., Romero-Martínez, L., & Pinos-Vélez, V. (2023). Assessing the potential of ultraviolet irradiation for inactivating waterborne fungal spores: kinetics and photoreactivation studies. *Frontiers in Environmental Science*, 11, 1212807. <https://doi.org/10.3389/FENVS.2023.1212807/BIBTEX>
- Duque-Sarango, P., Mera-Parra, C., & Cedillo, S. (2025). Integrating practical teaching in environmental engineering: a case study of a fecal sludge treatment system in the rural sector of Tarqui Parish, Cuenca Canton-Azuay. In *Educación salesiana e interculturalidad. Reflexiones y prácticas para la transformación social* (pp. 101–120). Abya-Yala. <https://doi.org/10.17163/abyaups.114.922>
- Duque-Sarango, P., Robles, K., & Cedillo, S. (2026). *Smart Irrigation Technology, Ensuring Water Availability: An Automated Approach for Greenhouse Water Management*. 283–295. https://doi.org/10.1007/978-3-031-98290-3_21
- Enríquez, F., & Vásquez, I. (2022). *Análisis y verificación del estado trófico en la laguna San Martín mediante teledetección y datos “in situ.”* Universidad Politécnica Salesiana.
- Ferrer, J., & Seco, A. (2010). *Tratamiento Físicos y Químicos de Aguas Residuales* (U. P. de Valencia, Ed.; 6th ed.).

- Ferrer, J., Seco, A., Robles, Á., Asensi, E., & Serraltal, J. (2022). *Tratamientos Biológicos de Aguas Residuales* (UPV, Ed.; 4th ed.).
- Gaibor, J. (2014). *Caracterización del agua residual generada en la planta de lácteos El Salinerito – parroquia Salinas – cantón Guaranda para el diseño de una planta de tratamiento*. *Revista de Investigación Talentos*, 1(1). Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8551331>
- Garzón, M., Buelna, G., & Moeller, G. (2012). La Biofiltración Sobre Materiales Orgánicos, Nueva Tecnología Sustentable para Tratar Agua Residual en Pequeñas Comunidades e Industrias. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 3(3), 153–161.
- Huamán, C. (2016). *Evaluación de la Eficiencia de Remoción de Contaminantes Mediante Filtros de Residuos Orgánicos en Aguas Residuales de Granjas Porcinas* [Universidad Nacional del Centro de Perú]. [http://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/UNCP/3928/Calcina Sotelo .pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/UNCP/3928/Calcina_Sotelo.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Jaramillo Campoverde, P. N. (2020). *Análisis de la efectividad de coagulantes a base de taninos para el tratamiento de aguas residuales procedentes de la industria láctea* (Trabajo de titulación, Universidad de las Américas, Quito). Repositorio Digital Universidad de Las Américas. <https://dspace.udla.edu.ec/bitstream/33000/12052/1/UDLA-EC-TIAM-2020-05.pdf>
- Macías, G. (2021). *Aprovechamiento de Residuos de Cáscara de Cacao en la Obtención de Carbón Activado para ser Usado como Medio Filtrante*. Universidad Técnica Estatal de Quevedo.
- MAG. (2024a). *Anuario Agropecuario 2022–2023*. Anuario Agropecuario 2022–2023.

- MAG. (2024b). *Capacitación en calidad de leche y derivados lácteos en el cantón El Tambo*.
Capacitación En Calidad de Leche y Derivados Lácteos En El Cantón El Tambo.
- Martínez, I., Santiago, C. A., Limón, R. A., López, V., & Aguilar, F. A. (2021). Tratamiento de agua residual de beneficio de café mediante un biofiltro de bajo costo. *Revista Ingeniantes*, *1*(1), 60–67.
- Maya, K. (2019). *Análisis de la Cáscara de Cacao como Filtro en el Tratamiento de Aguas Residuales Provenientes de la Industrias de Lácteos Salinerito de la Ciudad de Guaranda* [Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica].
<http://repo.uta.edu.ec/bitstream/handle/123456789/5301/Mg.DCEv.Ed.1859.pdf?sequence=3>
- Metcalf, & Eddy. (2014). *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery* (McGraw-Hill Education, Ed.; 5th ed.).
- Moreno, D., Quintero, J., & López, A. (2017). Métodos para identificar, diagnosticar y evaluar el grado de eutrofia. *Rbrh*, *22*(0), 25–33. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.011716072>
- Moreta, J. C. (2008). *La Eutrofización de los Lagos y sus Consecuencias*. Ibarra 2008. Universidad Técnica del Norte.
- MowbraySean. (2022). *Nuevo informe revela la cadena de daños que provocan las aguas residuales al planeta*. Mongabay. <https://es.mongabay.com/2022/02/nuevo-informe-revela-cadena-de-danos-que-provocan-las-aguas-residuales-al-planeta/>
- OMS. (2022). *Agua para consumo humano*. Organización Mundial de La Salud.
- Palomino, G. (2020). *Revisión Sistemática sobre la Aplicación de Electrocoagulación en el Tratamiento de Aguas Residuales de la Industria Láctea* [Universidad César Vallejo].
http://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/47102/Gutierrez_RS-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y

- Proaño, R., & Gualoto, K. (2018). Wastewater treatment of industrial loads with advanced oxidation in conventional systems. *Granja*, 27(1), 103–111. <https://doi.org/10.17163/lgr.n27.2018.08>
- Reddy, K. H., & Kasianantham, N. (2024). Sustainable assessment of low viscous biofuel for compression ignition engine using wear debris analysis – Tribological investigation. *Case Studies in Thermal Engineering*, 58, 104443. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.104443>
- Riojas González, H., Torres Bustillos, L., Mondaca Fernández, I., Balderas Cortes, J., & Gortáres Moroyoqui, P. (2010). Efectos de los surfactantes en la biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos. *Revista Química Viva -Número*, 3(9), 120–145.
- Romero, L. (2021). *Los Parámetros Químicos - Físicos en el Proceso de Autrofización de las Aguas de la Laguna de Pucush Uclo, Chupaca, 2019*. Universidad Peruana Santo Tomás de Aquino de Ciencia e Integración.
- Romero-Martínez, L., Duque-Sarango, P., Acevedo-Merino, A., & Nebot, E. (2019a). Comparing the inactivating efficacy of enteric bacteria in seawater treated with different configurations of continuous flow-through ultraviolet devices: single-pass and recirculation. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 94(2980–2989), jctb.6108. <https://doi.org/10.1002/jctb.6108>
- Romero-Martínez, L., Duque-Sarango, P., Acevedo-Merino, A., & Nebot, E. (2019b). Comparing the inactivating efficacy of enteric bacteria in seawater treated with different configurations of continuous flow-through ultraviolet devices: single-pass and recirculation. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 94(9), 2980–2989. <https://doi.org/10.1002/JCTB.6108>
- Romero-Martínez, L., Duque-Sarango, P., Acevedo-Merino, A., & Nebot, E. (2019c). Comparing the inactivating efficacy of enteric bacteria in seawater treated with different

configurations of continuous flow-through ultraviolet devices: single-pass and recirculation. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 94(9), 2980–2989.
<https://doi.org/10.1002/jctb.6108>

Salinas, J., & Sarmiento, R. (2020). *Biorremediación de HAPs en microcosmos de suelo mediante bioestimulación con nitrógeno nivel de laboratorio* [Universidad Politécnica Salesiana]. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/19781/1/UPS-CT008953.pdf>

Sanchez, E. (2014). *Propuesta de Elaboración y Comercialización de Filtros Adsorbentes para Aguas Contaminadas a Partir de la Cáscara de la Mazorca de Cacao como Adsorbente en la Ciudad de Guayaquil*. Universidad de Guayaquil.

Sosa, D., Viguera, J., & Holguín, E. (2014). La Biofiltración: una Alternativa Sustentable para el Tratamiento de Aguas Residuales. *Vidsupra*, 6, 56–60.
<https://repositoriodigital.ipn.mx/bitstream/123456789/24059/1/VIDSUPRA VOL 6 NUM 2.pdf#page=17>

Soto, C. (2019). Filtros de cáscara de cacao (*Theobroma cacao*) para la adsorción de plomo (II) en aguas de relave minero-2019 [Universidad Alas Peruanas]. In *Repositorio Institucional - UCV*. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/49692>

Suarez Beltran, R. (2013). Guía de Métodos de Biorremediación para la Recuperación de Suelos Contaminados por Hidrocarburos. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699.

Tirado, D., Gallo, L., Acevedo, D., & Bello, J. (2016). Biotratamientos de Aguas Residuales en la Industria Láctea. *Producción + Limpia*, 11(1), 171–184.
<https://doi.org/10.22507/pml.v11n1a16>

Toapanta, L. (2024a). *Diseño De Una Planta De Tratamiento De Agua Residual De Una Empresa Procesadora De Lácteos Ubicado En La Parroquia De Mulaló Del Cantón*

Latacunga Provincia De Cotopaxi. ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO.

Toapanta, L. (2024b). *Diseño de una Planta de Tratamiento de Agua Residual de una Empresa Procesadora de Lácteos Ubicado en la Parroquia de Mulaló del Cantón Latacunga Provincia de Cotopaxi.*

Torres, F. (2014). *Tratamiento De Aguas Residuales Mediante La Combinación De Técnicas Avanzadas De Oxidación Y Biofiltros.* Universidad de las Palmas de Gran Canaria.

Torske, M. (2019). *La Realidad de las Aguas Servidas en Ecuador.* YAKUNINA.
<https://www.yakunina.com/la-realidad-de-las-aguas-servidas-en-ecuador/>

Tucunango, E. (2023). *Diseño de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la Industria “Lácteos Mi Veleta”, Chambo - Chimborazo.* Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

UNESCO. (2017). *UNESCO World Water Assessment Programme.* The United Nations World Water Development Report. Wastewater the Untapped.
<https://reefresilience.org/es/management-strategies/wastewater-pollution/wastewater-pollution-introduction/>

Valdivieso, E. (2023). *Diseño de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Generadas en la Industria “Lácteos del Valle”, en el Catón Chaco - Provincia de Napo.* Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Valdiviezo, E. (2023). *Diseño de una Planta de Tratamientos de Aguas Residuales Lácteas Generadas en la Industria “Lácteos El Valle”, en el Cantón Chaco, Provincia de Napo.*
ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO.

- Vasquez Aranda, A., Iannacone, J., Peña, A., & Romero Echevarría, L. (2022). Tratamiento de lixiviados por oxidación avanzada: Una revisión. *Campus*, 27(33), 57–74. <https://doi.org/10.24265/campus.2022.v27n33.04>
- Vigueras, J. (2012). *Innovación tecnológica para tratamiento de aguas residuales domesticas con biofiltros orgánicos*. Instituto Politécnico Nacional.
- Wear, S., & Vega, R. (2015). Mitigation is Key for Coral Reef Stewardship. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1, 15–30. <https://reefresilience.org/es/management-strategies/wastewater-pollution/wastewater-pollution-introduction/>
- Zambrano, L., Lozada, J., & Ponce, D. (2022). Tratamiento de Aguas Servidas a través de un Control Informático de Automatización, La Maná Ecuador. *Revista Universidad y Sociedad*, 14(8.5.2017), 2003–2005.

7. ANEXOS

7.1. ANEXO TÉCNICO

FICHA TÉCNICA – MEZCLADOR DE COAGULACIÓN (Mezcla Rápida)

Identificación

Equipo: Agitador para coagulación

Aplicación: Proceso de coagulación en tratamiento de aguas residuales (línea de pretratamiento)

Caudal tratado: 0,513 L/s

Volumen de tanque asociado: 0,02 m³

Tabla 28: Especificaciones Mecánicas

Parámetro	Requerimiento
Tipo de agitador	Vertical con eje sumergido
Diámetro del impulsor	0,12 m (12 cm)
Tipo de palas	Hélice de 3 palas, inclinadas
Material de impulsor	Acero inoxidable AISI 316
Material de eje	Acero inoxidable AISI 316
Material de sello	Empaque mecánico resistente a corrosión
Soporte y montaje	Brida superior para fijación a tapa o estructura

Tabla 29: Especificaciones Operativas

Parámetro	Valor
Velocidad de operación	480 rpm ($\pm 10\%$)
Velocidad mínima	300 rpm
Velocidad máxima	600 rpm

Potencia instalada	0,03 HP (\approx 25 W)
Control de velocidad	Variador de frecuencia (VFD) integrado
Tipo de motor	Motor eléctrico monofásico o trifásico
Frecuencia	50–60 Hz
Protección	IP55 o superior
Aislamiento	Clase F o H

Tabla 30: Especificaciones Eléctricas

Parámetro	Valor
Tensión típica	220–240 V (monofásico) o 380–415 V (trifásico)
Arranque	Suave (VFD)
Consumo estimado	< 0,1 A

Tabla 31: Condiciones de Operación

Parámetro	Rango Aceptable
Temperatura del agua	10–35 °C
pH de operación	5.5–8.5
Densidad del líquido	\sim 1000 kg/m ³
Altura de inmersión mínima	\geq 0.15 m

FICHA TÉCNICA – MEZCLADOR DE FLOCULACIÓN (Mezcla Lenta)

Identificación

Equipo: Agitador para floculación

Aplicación: Proceso de floculación en tratamiento de aguas residuales

Caudal tratado: 0,513 L/s

Volumen total de cámaras: 0,80 m³ (3 cámaras)

Tabla 32: Especificaciones Mecánicas

Parámetro	Requerimiento
Tipo de agitador	Vertical con eje sumergido
Diámetro del impulsor	0,27 m (27 cm)
Tipo de palas	Palas planas o marco (bajo corte)
Material de impulsor	Acero inoxidable AISI 316
Material de eje	Acero inoxidable AISI 316
Soporte y montaje	Brida superior

Tabla 33: Especificaciones Operativas

	Velocidad de operación	Potencia recomendada
Floc 1	18 rpm	0,02 HP (≈ 15 W)
Floc 2	13 rpm	0,02 HP (≈ 15 W)
Floc 3	9 rpm	0,02 HP (≈ 15 W)

Recomendación de control:

- Variador de frecuencia (VFD) para ajustar velocidades entre cámaras.

Tabla 34: Especificaciones Eléctricas

Parámetro	Valor
Tensión típica	220–240 V (monofásico) o 380–415 V (trifásico)
Tipo de motor	Motorreductor con engranajes helicoidales o planetarios
Protección	IP55 o superior
Control de velocidad	VFD

Tabla 35: Condiciones de Operación

Parámetro	Rango Aceptable
Temperatura	10–35 °C
pH	5.5–8.5
Sustancias en agua	Grasas, proteínas y sólidos suspendidos
Altura mínima de inmersión	≥ 0,15 m

Accesorios

- ✓ Variador de frecuencia VFD
- ✓ Accionamiento con embrague de seguridad
- ✓ Soporte estructural adicional (columnas, tubos)
- ✓ Indicador de rpm montado en panel

Documentación Requerida para Cotización

- Croquis del sistema de floculación
- Altura total de tanque
- Tipo de estructura de soporte
- Requisitos eléctricos locales
- Certificaciones de motor

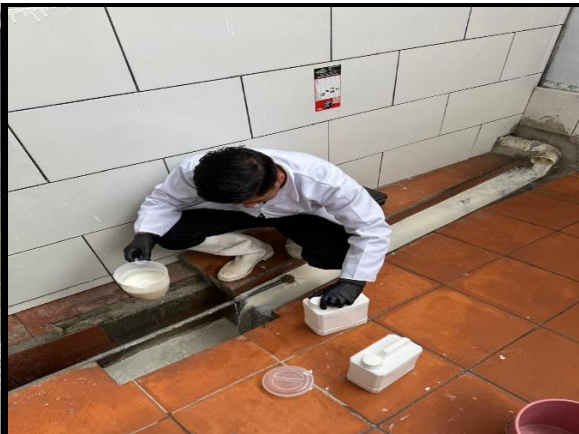
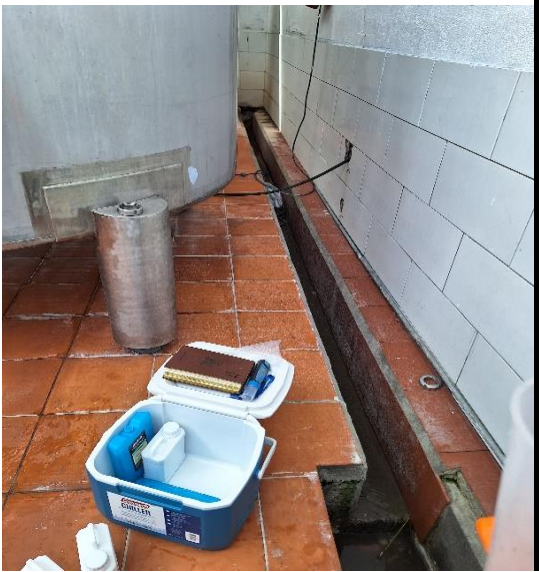
Tabla 36: Opciones de Modelos Comerciales Sugeridos

Proveedor	Modelo/Sugerencia	Aplicación	Comentario	Link de referencia
Autmix	CT-R Series	Coagulación	Ajuste de rpm en amplio rango	https://autmix.com/en/autmix-flow-agitators/industrial-mixers/compact/gearbox-unit-ctr-serie Autmix (2024)
Kozegho	Agitadores floculación	Floculación	Palas diseñadas para bajo corte	https://www.kozegho.com/es/agitadores-proceso-de-floculacion/?utm_source=chatgpt.com Kozegho (2024)
Mixquip	Agitadores industriales	Coagulación/Floculación	Soluciones a medida	https://mixquip.com/mixers-agitators/ Mixquip (2026)
Ingemindec	Mezcladores personalizados	Coagulación/Floculación	Fabricación local en Ecuador	https://ingemindec.com/mezcladores-industriales/ Ingemindec (2026)

REGISTRO FOTOGRAFICO

7.2. Documentación fotográfica del levantamiento de información y toma de muestras en la planta enfriadora de leche







Documentación fotográfica del análisis de laboratorio Jar Test



