



FACULTAD DE ARQUITECTURA E INGENIERÍAS

Trabajo de fin de Carrera titulado:

Diseño del sistema de tratamiento de aguas residuales de una planta procesadora de productos lácteos a través de la evaluación de sus efluentes industriales.

Realizado por:

Santiago Patricio Marcillo Páez

Director del proyecto:

Ing. Katty Verónica Coral – Carrillo PhD

Como requisito para la obtención del título de:

INGENIERO AMBIENTAL

QUITO, 31 de Marzo 2026

DECLARACIÓN JURAMENTADA

Yo, Santiago Patricio Marcillo Páez, ecuatoriano, con Cédula de ciudadanía N° 1712514726, declaro bajo juramento que el trabajo aquí desarrollado es de mi autoría, que no ha sido presentado anteriormente para ningún grado o calificación profesional, y se basa en las referencias bibliográficas descritas en este documento.

A través de esta declaración, cedo los derechos de propiedad intelectual a la UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK, según lo establecido en la Ley de Propiedad Intelectual, reglamento y normativa institucional vigente.

Santiago Patricio Marcillo Páez

C.I.: 1712514726

DECLARACIÓN DEL DIRECTOR DE TESIS

Declaro haber dirigido este trabajo a través de reuniones periódicas con el estudiante, orientando sus conocimientos y competencias para un eficiente desarrollo del tema escogido y dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación.

Katty Coral- Carrillo

CI: 1709054058

LOS PROFESORES INFORMANTES:

Dra. Johanna Medrano

Dr. Miguel Martínez - Fresneda

Después de revisar el trabajo presentado lo han calificado como apto para su defensa oral ante el tribunal examinador.

Dra. Johanna Medrano

Dr. Miguel Martínez

Quito, 31 de Marzo de 2026

DECLARACIÓN DE AUTORÍA DEL ESTUDIANTE

Declaro que este trabajo es original, de mi autoría, que se han citado las fuentes correspondientes y que en su ejecución se respetaron las disposiciones legales que protegen los derechos de autor vigentes.

Santiago Patricio Marcillo Páez

C.I.: 1712514726

Agradecimientos

A mi familia, el puerto seguro donde siempre pude regresar cuando el camino se tornaba difícil. A mis padres, por ser el cimiento de mis valores y por enseñarme que la perseverancia es la clave de cualquier sueño; gracias por su paciencia infinita y por creer en mí incluso cuando yo mismo dudaba. A mis hermanas y sobrinas, cuyo apoyo incondicional y alegría fueron el motor necesario para no rendirme durante este largo tiempo de espera. Este logro es, en gran medida, el resultado de su amor y compañía.

A mi hijo, mi razón de ser y mi mayor inspiración. Cada hora de estudio, cada sacrificio y cada momento de ausencia han tenido un único propósito: construir para ti un futuro mejor. Eres el motor que impulsa cada uno de mis pasos y el recordatorio constante de que todo esfuerzo vale la pena. Todo lo que hago es por ti y para ti, con la esperanza de ser el ejemplo de tenacidad que mereces tener a tu lado.

Un agradecimiento profundamente especial a Katty Coral. Desde el primer día de mi formación universitaria, ha sido mucho más que una docente; ha sido un referente de integridad y excelencia. Gracias por haber creído en mi capacidad y en todos los alcances que puedo tener, incluso antes de que yo los descubriera. Su labor formando no solo profesionales, sino seres humanos de gran valor, dejará una huella imborrable en mi vida y en mi carrera. Gracias por estar presente desde el inicio y por seguir siendo esa guía fundamental hasta el día de hoy.

Gracias!

Resumen

El presente trabajo de investigación surgió ante la creciente preocupación por el impacto ambiental que generan las descargas líquidas provenientes de las plantas procesadoras de productos lácteos. Estas industrias requieren grandes volúmenes de agua para sus procesos de limpieza, pasteurización y enfriamiento, lo que a su vez origina efluentes con altas concentraciones de materia orgánica, grasas, sólidos suspendidos y detergentes. Se entiende que si estos residuos no mantienen un tratamiento adecuado pueden llegar a alterar los ecosistemas acuáticos y afectar la salud pública. El objetivo principal de la investigación fue el diseño técnico de un sistema de tratamiento de aguas residuales (PTAR) para una planta procesadora de lácteos, basado en la caracterización físico-química de sus efluentes. El alcance del proyecto comprende desde el diagnóstico de la carga contaminante hasta el dimensionamiento de las unidades de tratamiento necesarias para garantizar el cumplimiento de los límites máximos permisibles establecidos en el Acuerdo Ministerial 097-A.

La metodología consistió en la identificación de puntos críticos y un proceso de toma de muestras puntuales ejecutado por un laboratorio acreditado, asegurando la trazabilidad y fiabilidad de los resultados. Estos fueron evaluados bajo los estándares de descarga del AM 097-A, evidenciando que el efluente crudo excede los parámetros legales. Por tanto, la propuesta técnica se enfoca en la remoción eficiente de carga orgánica y grasas para asegurar la calidad del cuerpo receptor conforme a la normativa vigente

Palabras clave: Efluentes, industria láctea, normativa ambiental, Diseño, Tratamiento de aguas , Sostenibilidad

Abstract

This research emerged from the growing concern regarding the environmental impact of liquid discharges from dairy processing plants. These industries require high volumes of water for cleaning, pasteurization, and cooling processes, which in turn generate effluents with high concentrations of organic matter, fats, suspended solids, and detergents. It is understood that without adequate treatment, these residues can alter aquatic ecosystems and affect public health. The primary objective of this study was the technical design of a wastewater treatment plant (WWTP) for a dairy facility, based on the physicochemical characterization of its effluents. The project scope ranges from the diagnostic of the pollutant load to the dimensioning of the treatment units required to ensure compliance with the maximum permissible limits established in Ministerial Agreement 097-A.

The methodology involved identifying critical control points and a grab sampling process conducted by an accredited laboratory, ensuring the traceability and reliability of the results. These were evaluated against the discharge standards of AM 097-A, revealing that the raw effluent exceeds legal parameters. Consequently, the technical proposal focuses on the efficient removal of organic load and fats to safeguard the quality of the receiving water bodies in accordance with current regulations.

Keywords: Effluents, Dairy industry, Environmental regulations, Design, Water treatment, Sustainability

Índice de Contenidos

Introducción	1
Antecedentes	3
Planteamiento del Problema	5
Justificación	7
Objetivo.....	8
Objetivos ODS que persigue el proyecto.....	9
Hipótesis	9
El agua	10
Industria láctea	11
Parámetros físicos	14
Parámetros químicos	14
Parámetros físicos	15
Parámetros microbiológicos.....	15
Metodología	19
Resultados	23
Memoria de Cálculo y Dimensionamiento del Sistema de Tratamiento de Agua	29
Pretratamiento del agua residual	39
Homogenización y estabilización del efluente	41
Tratamiento primario	42
Tratamiento biológico	45
Clarificación secundaria y separación de biomasa	46
Desinfección, almacenamiento y reutilización del agua tratada.	47
Manejo de lodos.....	48
Discusión de Resultados	51
Análisis de Viabilidad del Proyecto.....	52
Conclusiones	54
Recomendaciones	55

	X
Lista de referencias	45
Anexo	49

Lista de tablas

Tabla 1	Límites
máximos permisibles para descargas de efluentes industriales a cuerpos de aguadulce	16
Tabla 2	Comparación
de la calidad del efluente de ingreso frente a la normativa ecuatoriana del ambiente.....	25
Tabla 3	Diagnóstico
de Puntos Críticos y Medidas de Diseño Propuestas.....	28
Tabla 4	Parámetros de Diseño y Rendimiento del Espesamiento de Lodos Mixtos
	38
Tabla 5	Datos
y dimensiones del tanque Cárcamo de bombeo	39
Tabla 6	Datos
y dimensiones del tanque para la trampa de grasas	41
Tabla 7	Datos
y dimensiones del tanque de homogeneización	42
Tabla	8
Datos y dimensiones del compresor de aire.....	43
Tabla 9	Datos
y dimensiones del tanque de flotación por aire difuso.....	44
Tabla 10	Datos
y dimensiones del tanque biorreactor	45
Tabla 11	Datos
y dimensiones del tanque de almacenamiento de PAC Y POLÍMERO	47
Tabla 12	Datos
y dimensiones del tanque de Hidroneumático	48
Tabla 13	Datos
y dimensiones del tanque de lodos y del equipo deshidratador de lodos.....	49

Tabla 14 Soluciones en problema en el pretratamiento	49
Tabla 15 Soluciones en problema en el tratamiento biológico	50
Tabla 16 Soluciones en problema en la deshidratación de lodos.....	51

Lista de figuras

Figura 1. Proceso de producción láctea	13
Figura 2 Diagrama de Flujo PTAR.....	28
Figura 3 Visualización del diseño de la planta en 3D.....	50
Figura 4 Vista del diseño de la planta en 3D, lateral.	50

Lista de anexos

Anexo 2 Guía para la solución de problemas en el Sistema	49
--	----

Introducción

El sector lácteo constituye una de las principales actividades agroindustriales del Ecuador, no solo por su aporte económico y social, sino también por su papel esencial en la seguridad alimentaria y el desarrollo de las zonas rurales (MAG, 2023). Las industrias procesadoras de leche utilizan grandes volúmenes de agua, especialmente en sus procesos de lavado, en la pasteurización y en el enfriamiento, que da como resultado efluentes que contienen altas concentraciones de materia orgánica, grasas, sólidos suspendidos y agentes químicos como detergentes (Samaniego & Núñez, 2022). Si estas descargas no son tratadas de manera adecuada, pueden afectar la calidad del agua de los ríos y quebradas, alterar los ecosistemas acuáticos y comprometer la salud pública de las comunidades cercanas (Metcalf & Eddy, 2014).

La gestión ambiental en los últimos años, en la industria alimentaria ha adquirido una creciente preocupación y se considera una presión social, internacional lo cual ha impulsado la creación de sistemas de tratamiento de aguas residuales en el ámbito nacional, el Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE), como autoridad ambiental nacional, establece los límites máximos permisibles de descarga. Para este fin, rige el Acuerdo Ministerial No. 097-A, mediante el cual se expidió la 'Reforma del Anexo 1 del Libro VI del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente: Norma de Calidad Ambiental y de Descarga de Efluentes al Recurso Agua'. Esta normativa técnica es el instrumento legal que define los parámetros físico-químicos obligatorios para las descargas de aguas residuales industriales tanto a cuerpos de agua dulce como a sistemas de alcantarillado."

El propósito de este proyecto es analizar y comprender en detalle la situación de los efluentes generados en una planta procesadora de productos lácteos, identificando sus características y

proponiendo un sistema de tratamiento que responda a las necesidades reales del proceso productivo. Su valor radica en ofrecer información útil y aplicable que permita optimizar el uso del agua y reducir la contaminación generada por este tipo de industrias. A largo plazo, los resultados podrán servir de base para que otras industrias lácteas implementen soluciones similares, promoviendo una producción más limpia, responsable y en armonía con el entorno.

Basado en la revisión literaria y en los vacíos identificados en la gestión de efluentes, la investigación se justifica en la necesidad de fortalecer la sostenibilidad industrial mediante soluciones técnicas que integren la responsabilidad ambiental con la productividad, promoviendo el uso eficiente del recurso hídrico en el sector lácteo ecuatoriano. Bajo esta premisa, la hipótesis general plantea que el diseño de un sistema de tratamiento de aguas residuales (PTAR), sustentado en la evaluación físico-química de los efluentes, permite optimizar la eficiencia del proceso, reducir la carga contaminante y garantizar el cumplimiento de los límites máximos permisibles del Acuerdo Ministerial 097-A. Para contrastar esta hipótesis, el objetivo principal del estudio fue diseñar técnicamente el sistema de tratamiento a través de la identificación de puntos críticos y una caracterización de los efluentes realizada por un laboratorio acreditado mediante tomas de muestra puntuales; lo cual permitió evaluar el desempeño actual frente a los estándares nacionales y proponer un dimensionamiento que asegure la preservación de los ecosistemas receptores. En el presente estudio buscó diseñar el sistema de tratamiento de aguas residuales de una planta procesadora de productos lácteos a través de la evaluación de la calidad de sus efluentes industriales para asegurar el cumplimiento de la normativa ambiental vigente, mejorar la eficiencia del tratamiento y reducir el impacto ambiental, mediante una caracterización de los efluentes industriales, evaluación del desempeño, para identificar los puntos críticos, para proponer un diseño técnico del sistema de tratamiento.

El trabajo se enmarcó en la necesidad de fortalecer la sostenibilidad industrial mediante soluciones técnicas aplicables, que integren la responsabilidad ambiental con la productividad empresarial. De esta manera, se pretende aportar una propuesta viable que promueva el uso eficiente del recurso hídrico y contribuya a la preservación de los ecosistemas, consolidando así una visión moderna y comprometida con el desarrollo sostenible del sector lácteo ecuatoriano.

Antecedentes

A nivel nacional, el sector lácteo ha experimentado un crecimiento sostenido durante las últimas décadas, consolidándose como una de las principales industrias agroalimentarias del Ecuador. Este avance ha dinamizado las economías rurales, generado empleo y fortalecido la seguridad alimentaria. Sin embargo, este desarrollo no siempre ha ido acompañado de una gestión ambiental adecuada (Landi, 2018). Las plantas procesadoras de leche utilizan grandes volúmenes de agua en sus operaciones de lavado, pasteurización y enfriamiento, lo que genera efluentes con altas concentraciones de materia orgánica, grasas, detergentes y sólidos suspendidos (Samaniego & Núñez, 2022).

Diversos estudios realizados por el Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE) y por organismos internacionales como la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) han evidenciado que los efluentes del sector lácteo ecuatoriano presentan concentraciones elevadas de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅), Demanda Química de Oxígeno (DQO) y Sólidos Totales, superando en muchos casos los límites máximos permisibles establecidos en la normativa ambiental vigente (MAATE, 2021; FAO, 2020). Estas cifras reflejan una alta carga contaminante y un riesgo potencial de afectación a los

cuerpos de agua, especialmente en zonas rurales donde las descargas se realizan directamente en quebradas o canales agrícolas sin un tratamiento previo.

En provincias con alta producción láctea, como Pichincha, Cotopaxi, Tungurahua y Carchi, se han implementado diferentes tecnologías para el tratamiento de aguas residuales, entre ellas lagunas de oxidación, filtros biológicos, reactores anaerobios y sistemas combinados de lodos activados. No obstante, su desempeño depende en gran medida del diseño hidráulico, del tipo de proceso productivo y de la constancia en el monitoreo operativo (Henze et al., 2008; Metcalf & Eddy, 2014). La falta de mantenimiento preventivo, el sobredimensionamiento o subdimensionamiento de los tanques, y la ausencia de personal técnico especializado han disminuido la eficiencia de muchos de estos sistemas, provocando incumplimientos en los parámetros de vertimiento (Henze et al., 2008; Metcalf & Eddy, 2014).

Estas limitaciones ponen de manifiesto la necesidad de realizar diagnósticos técnicos actualizados que permitan evaluar el comportamiento real de los efluentes industriales y proponer diseños de sistemas de tratamiento más eficientes y sostenibles. La modernización de las plantas, junto con una gestión ambiental responsable, no solo contribuiría al cumplimiento normativo, sino también al fortalecimiento del compromiso empresarial con la sostenibilidad y la protección del recurso hídrico (WWAP, 2019).

Planteamiento del Problema

La contaminación de los diferentes cuerpos de agua es uno de los problemas de mayor recurrencia en la actualidad, debido a las actividades causadas por el crecimiento poblacional y diversos sectores industriales que contribuyen a la presencia de agentes nocivos a los recursos hídricos. En las investigaciones de Samaniego & Núñez (2022) y Landi, (2018), se determina que uno de los sectores con mayor concentración de contaminantes es el sector lácteo, que constituye una de las principales actividades agroindustriales del Ecuador, no solo por su aporte económico y social, sino también por su papel esencial en la seguridad alimentaria y el desarrollo de las zonas rurales (MAG, 2023). Las actividades propias del procesamiento de leche generan efluentes industriales con alta carga contaminante, derivados principalmente del uso intensivo de agua en operaciones de limpieza, pasteurización y enfriamiento. Si estas descargas no son tratadas correctamente, pueden afectar la calidad del agua de los ríos y quebradas, alterar los ecosistemas acuáticos y comprometer la salud pública de las comunidades cercanas (Metcalf & Eddy, 2014; WWAP, 2019).

En los últimos años la gestión ambiental dentro de la industria alimentaria ha adquirido una relevancia creciente. La presión social, los estándares internacionales y la necesidad de mantener una producción sostenible han impulsado a las empresas a revisar sus sistemas de tratamiento de aguas residuales. Es así que en la investigación de Aws, A et al. (2023) , se establece que el sector lácteo vierte al ambiente un volumen considerable de efluentes industriales sin ningún tipo de tratamiento, lo cual ha llegado a generar considerables problemas en la naturaleza y en el bienestar de las poblaciones aledañas a los cuerpos de agua, ya que estas aguas contienen lactosa, proteínas, contenido iónico y grasas , los cuales pueden

afectar considerablemente la carga biológica de los efluentes dañando directamente a los sistemas de alcantarillado o ríos cercanos (Aws, Jigar, Beszédes, & Kertész, 2023)

Las aguas residuales provenientes del sector lácteo se caracterizan por la presencia de altas concentraciones de nutrientes según la producción que se realice en la fábrica, conteniendo principalmente carbono, nitrógeno, fósforo y azufre; siendo contaminantes que pueden ser tratados mediante métodos amigables con el ambiente como biofiltros o plantas de tratamiento biológico de aguas. Es así como se ha propuesto en varios estudios el uso de tratamiento metanogénico para gestionar de manera eficiente las aguas residuales de la industria láctea (Ye & You Li, 2023).

Según, Das y Chen (2024), las aguas residuales derivadas de las actividades lácteas contienen grandes concentraciones de contaminantes inorgánicos y orgánicos; siendo necesarios de acuerdo a esta composición desarrollar técnicas más eficientes para su tratamiento; por lo que en su investigación se propone la utilización de procesos avanzados como la oxidación electroquímica, que mediante una combinación de diversos tratamientos de oxidación como la anódica, electroFenton, fotoelectro-Fenton y fotoelectro-Fenton solar sirven como técnicas efectivas para mitigar dichos contaminantes de las aguas residuales, mejorando la calidad del efluente (Das & Chen, 2024).

Justificación

Los sectores industriales deben ser responsables con los efluentes que se crean en sus procesos, dando una gestión adecuada a las aguas residuales que resultan como subproductos de sus etapas de producción, esto constituye uno de los principales desafíos actuales, por las descargas indiscriminadas a los cuerpos hídricos de los efluentes industriales (Metcalf & Eddy, 2014). La presente investigación mantiene una relevancia relevante ya que aborda de manera integral la caracterización de los efluentes industriales de una planta láctea y proponer un diseño técnico de su sistema de tratamiento, orientado a mejorar la calidad del efluente y reducir los impactos negativos hacia el ambiente.

La importancia del estudio radica en que mediante el análisis de la planta láctea y sus efluentes se establecerá una base técnica sólida para la toma de decisiones en la gestión ambiental de la empresa, mediante la integración de análisis fisicoquímicos, evaluación de puntos críticos del proceso productivo y la verificación del cumplimiento normativo.

Esta investigación se fundamenta en la generación de conocimientos aplicados y orientados a la resolución de problemas ambientales, más específicamente, la contaminación hídrica a través del uso crítico de aspectos técnicos y científicos, ya que la caracterización del efluente permite comprender el comportamiento y la variabilidad de las aguas residuales, siendo uno de los aspectos de importancia que resulta indispensable para el rediseño eficiente de un sistema de tratamiento de agua.

En el aspecto científico, la investigación proporciona técnicas sobre la aplicabilidad de los sistemas de tratamiento de aguas con tecnologías combinables desde el pretratamiento hasta tratamientos biológicos avanzados, para los efluentes industriales que tienen elevadas cargas

orgánicas. Por ende, los resultados obtenidos pueden servir para estudios posteriores o industrias con características similares (Samaniego & Núñez, 2022).

Desde una perspectiva social, esta investigación refuerza la protección de los recursos hídricos y de la salud pública, al mejorar la calidad de los efluentes vertidos. Esta mejora permite disminuir los riesgos asociados a la contaminación del agua, la degradación de los ecosistemas acuáticos, así como la implementación de recomendaciones derivadas del estudio para la promoción de una cultura ambiental (Landi, 2018; WWAP, 2019) .

Desde el ámbito económico, esta investigación presenta un impacto positivo fundamentado en la teoría de la eficiencia de recursos. Según **Porter y van der Linde (1995)**, una menor generación de contaminantes permite optimizar el uso de insumos, transformando costos operativos en ventajas competitivas. Asimismo, el cumplimiento normativo previene los costos por sanciones legales y fallas de cumplimiento, los cuales, de acuerdo con **Hansen y Mowen (2007)**, representan gastos evitables que comprometen la salud financiera de la organización. Finalmente, una gestión técnica de las agujas residuales no solo minimiza los gastos operativos, sino que fortalece el valor intangible de la marca y su responsabilidad social empresarial.

Objetivo

El presente estudio tiene como objetivo diseñar un sistema de tratamiento de aguas residuales para una planta procesadora de productos lácteos, a partir de la evaluación y caracterización de sus efluentes industriales, con el propósito de garantizar el cumplimiento de la normativa ambiental ecuatoriana vigente. Para ello, se realizó la identificación de las concentraciones de los principales parámetros fisicoquímicos y microbiológicos en muestras de entrada y salida del sistema, con el fin de determinar el nivel de contaminación y evaluar la eficiencia del tratamiento existente. Asimismo, se analizaron los puntos críticos del proceso

productivo que generan mayor carga contaminante y se evaluó el grado de cumplimiento del sistema actual respecto a los límites máximos permisibles establecidos en la legislación ambiental del Ecuador. Con base en los resultados obtenidos, se desarrolló una propuesta técnica para el diseño de un sistema de tratamiento de aguas residuales que permita mejorar la calidad del efluente, reducir la carga contaminante y fortalecer la gestión ambiental del proceso productivo conforme a la normativa nacional vigente.

Objetivos ODS que persigue el proyecto

Los objetivos de desarrollo sostenible mantienen integradas acciones para el desarrollo de actividades y políticas que se aporten a la protección de la salud humana y del bienestar del ambiente. En base a ello, uno de los objetivos que persigue este trabajo es el objetivo 6, que menciona agua limpia y saneamiento; a que la disminución de la contaminación de los efluentes de una planta láctea puede minimizar los niveles de contaminación a los cuerpos hídricos que podrían afectar de manera drástica a comunidades o poblaciones que hacen uso de los ríos como parte de su desarrollo local.

De igual forma se persigue el objetivo 9, en cuanto a la innovación e infraestructura, esto se debe a que el rediseño de la planta conlleva una inversión para la mejora de su estructura y con ello un crecimiento y desarrollo no solo económico sino de responsabilidad ambiental y social.

Hipótesis

La caracterización y evaluación de los efluentes industriales generados en una planta procesadora de productos lácteos permiten establecer las bases técnicas para el diseño de un sistema de tratamiento de aguas residuales que optimice la eficiencia del proceso de depuración,

reduzca la carga contaminante presente en el efluente y garantice el cumplimiento de los límites máximos permisibles establecidos en la normativa ambiental ecuatoriana vigente. En este sentido, la determinación de los principales parámetros físicoquímicos y microbiológicos en muestras de entrada y salida permite identificar el nivel de contaminación del efluente y evaluar el desempeño del sistema de tratamiento existente, mientras que el análisis comparativo de estos resultados con los valores establecidos en la legislación ambiental permite determinar el grado de cumplimiento normativo y reconocer los puntos críticos del proceso productivo que generan mayor carga contaminante. Con base en estos resultados, el diseño de una propuesta técnica de tratamiento de aguas residuales permitirá mejorar la calidad del efluente, disminuir los impactos negativos sobre los cuerpos hídricos receptores y fortalecer la sostenibilidad ambiental del ceso productivo.

Estado del arte

El agua

En el pasado, el agua era vista como un recurso natural sin límites, pero el deterioro ambiental en las últimas décadas ha puesto en duda esta creencia. La deforestación desmedida, la explotación ilegal de minerales, el avance industrial y diversas actividades humanas han contribuido a prácticas dañinas que afectan seriamente a los ecosistemas y al agua, lo que ha conducido a una cultura que no cuida adecuadamente la naturaleza y resulta en una severa escasez de este recurso (FAO, 2020). Actualmente, ya se perciben signos de pobreza extrema, hambre, migraciones descontroladas y problemas de salud. La falta de agua se presenta como una de las amenazas más serias para las economías globales y la seguridad alimentaria (ONU-Agua, 2021). Urge implementar modelos que ayuden a mitigar y reducir los impactos del cambio climático en los ecosistemas. Si el

crecimiento de la población sigue el ritmo que se anticipa, para el año 2050 se proyecta que se necesitarían tres planetas Tierra para brindar los recursos naturales necesarios para sostener el estilo de vida actual de la humanidad (Camacho, 2020).

Industria láctea

En la actualidad la industria láctea figura como una gran fuente de contaminación los recursos hídricos existentes, su producción genera contaminantes nocivos para el ambiente y en para la salud humana (Samaniego & Núñez, 2022). Por lo general, la industria láctea comienza con la recepción de la leche cruda como materia prima, la cual es sometida a un control inicial antes de su ingreso al sistema de almacenamiento primario. Posteriormente, la leche pasa al proceso de pasteurización con el fin de reducir la carga microbiana y garantizar la inocuidad del producto. En esta etapa se evalúa si la leche será sometida a un proceso de descremado, en cuyo caso se realiza la extracción de grasa para la obtención de crema como subproducto. Dependiendo de las características del producto final, la leche puede pasar por un proceso de hidrólisis mediante la adición de lactasa para la elaboración de productos deslactosados, verificando posteriormente que la condición requerida del producto se cumpla.

A continuación, se incorporan estabilizantes, vitaminas o minerales según los requerimientos del producto, procediendo a la etapa de mezcla y estandarización para ajustar sus características fisicoquímicas. Seguidamente, el producto se almacena previo a la homogenización, proceso que, de acuerdo con Tetra Pak (2015), reduce el tamaño de los glóbulos de grasa para mejorar la estabilidad de la emulsión. Posteriormente, se realiza la ultrapasteurización (UHT); este tratamiento térmico (generalmente entre 135-150°C) garantiza la eliminación de microorganismos patógenos y esporas, prolongando la vida útil del producto sin necesidad de refrigeración.

(Walstra, 2006)El producto tratado se dirige al almacenamiento aséptico y posteriormente al proceso de envasado utilizando material de empaque previamente preparado. Finalmente, los productos envasados pasan a las etapas de empacado y paletizado, almacenamiento en bodega, verificación del cumplimiento de los estándares de calidad y, una vez aprobados, se procede al almacenamiento final y despacho del producto terminado . La Figura 1 muestra este proceso productivo (Leche Gloria Ecuador, 2025)

Especialmente este proceso lácteo, genera grandes volúmenes de agua residual, por su consumo en la producción, estas aguas residuales comienzan a originarse desde el procesamiento de la leche, la concentración de las sustancias contaminantes, composición y el volumen de los afluentes depende en gran mayoría del tipo de surtido elaborado en la producción (Jiménez et al., 2023).

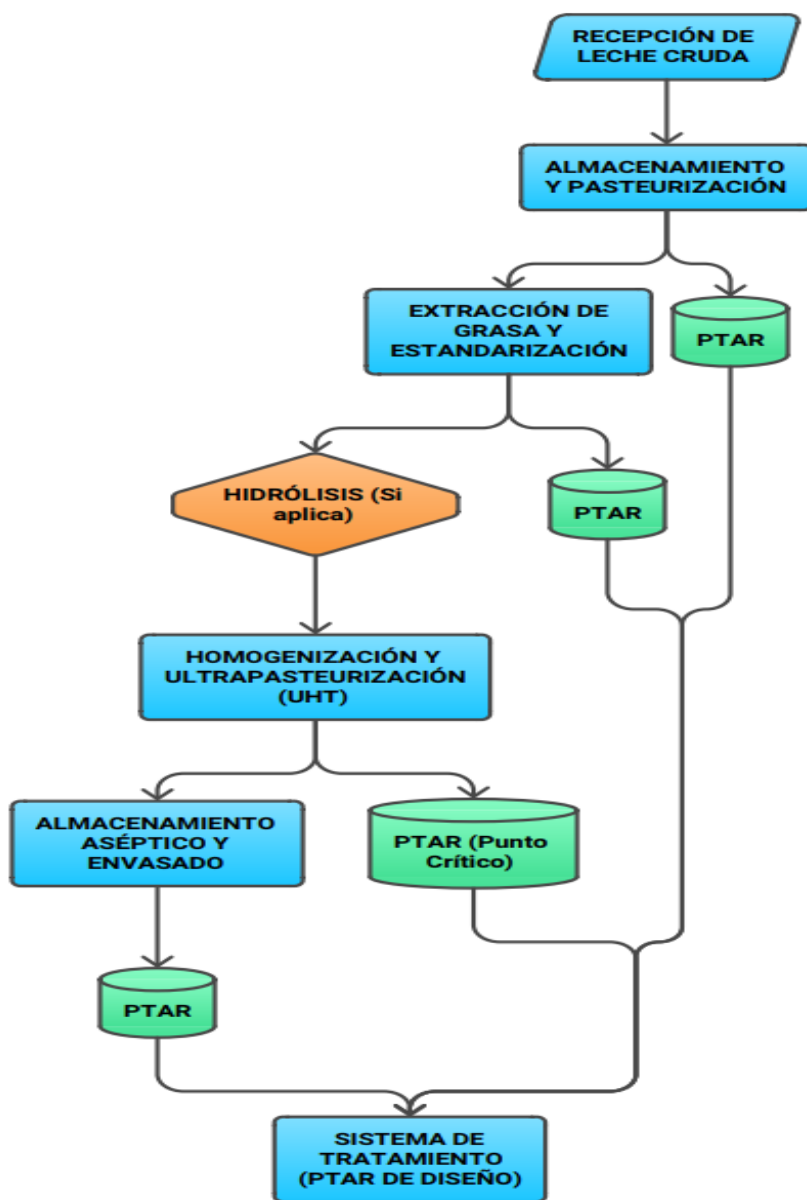


Figura 1. Proceso de producción láctea

Por lo tanto, para su tratamiento se deben considerar ciertos parámetros como los son:

Parámetros físicos

Temperatura: este parámetro influye en que tan lento o acelerado ocurren las actividades biológicas en el agua, como lo es la adsorción de oxígeno, precipitación de compuestos, la floculación, filtración y sedimentación (Samaniego & Núñez, 2022).

Parámetros químicos

Demanda bioquímica de oxígeno (DBO): el oxígeno está considerado como uno elemento de importancia para la degradación de la materia especialmente en el agua. Por lo que un alto contenido de materia orgánica genera el desarrollo de hongos y bacterias. Ocasionalmente que los cuerpos hídricos por la alta oxidación de materia orgánica se vean limitada el proceso de flora y fauna por la ausencia de oxígeno (Morales, 2021).

Oxígeno Disuelto (OD): como se ha establecido la presencia de oxígeno es esencial en los cuerpos de agua, ya que es su fuente para obtener aire, es decir, que cuando estos niveles de oxígeno son bajos, pueden ser un indicador de contaminación elevada (Vertil, 2016).

Nitratos: estos compuestos se presentan el estado de oxidación más alto del ciclo del nitrógeno, el cual se ha alcanzado luego de la oxidación biológica; se consideran una fuente de nutrientes muy significativos para los microorganismos autótrofos. Por ello, grandes concentraciones de nitratos ocasionan que en muchos casos estos microorganismos no crezcan en el medio (Morales, 2021).

Acorde con Coral K (2013), la selección de parámetros analítico de efluentes industriales debe corresponderse con la tipología del sistema productivos, un análisis de todos los parámetros

del AM 097 A, resulta costoso para las empresas y proporciona escasa información para el diseño. (Coral Carrillo, 2013)

Parámetros físicos

pH: el potencial hidrógeno es un parámetro básico que se utiliza para determinar en una escala que tan acida, alcalino o neutra se encuentra; si el pH es menor de 7 significa que el cuerpo de agua es ácido; mientras que si es superior a los 7 se considera alcalina. Se considera que aguas con un pH de 6,5 a 6,8 no se encuentran contaminadas (Quintuña & Samaniego, 2021).

Parámetros microbiológicos

Éstos parámetros muestran la presencia de ciertos microorganismos que crecen en condiciones en donde el agua se encuentra contaminada tales como estreptococos fecales, coliformes totales, coliformes fecales, para determinar su presencia se realiza una recolección de la muestra, y se conlleva un procedimiento de cultivo para la identificación de colonias (Samaniego & Núñez, 2022).

Tabla 1***Límites máximos permisibles para descargas de efluentes industriales a cuerpos de aguadulce***

Parámetro	Unidad	Límite máximo permisible
pH	unidades de pH	6 – 9
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	mg/L	100
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L	250
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg/L	100
Aceites y Grasas	mg/L	30
Temperatura	°C	≤ 35
Coliformes fecales	NMP/100 mL	2000

Fuente: Adaptado del Acuerdo Ministerial MAATE-2021-097-A. Norma de Calidad Ambiental y de Descarga de Efluentes al Recurso Agua

Sistemas de tratamiento de aguas residuales

Los sistemas de tratamiento de aguas residuales se han establecido con el fin de tratar las aguas vertidas y estas cumplan con los requisitos establecidos en la normativa nacional, lo cual se logra por medio de la eliminación de componentes definidos como agentes nocivos para el medio ambiente y la salud humana. Existen varias tecnologías que se han usado para el tratamiento de aguas, haciendo difícil precisar un tratamiento estandarizado para las actividades lácteas (León et al., 2020). Sin embargo, se puede mostrar de forma general los tratamientos más usados:

Pretratamiento: es un tratamiento previo que sirve para acondicionar las aguas residuales antes de ser sometidas a un proceso biológico o más conocido como tratamiento secundario. Es decir, se realiza la separación del material flotante, arena, grasas y aceites (Desarenador,

Sedimentador). Se presta atención al pH de las aguas residuales especialmente las derivadas de la industria láctea misma que puede llegar a tener valores ácidos muy altos (Landi, 2018).

Tratamiento Primario: en este tratamiento se reduce los sólidos en suspensión, así como la turbidez y la demanda bioquímica de oxígeno; mediante este proceso se puede eliminar cierta parte de la contaminación microbiana como los son las coliformes y los estreptococos. A este proceso se lo puede complementar con la decantación primaria, procesos fisicoquímicos y flotación (Chávez, 2017).

Tratamiento secundario: lo que se busca es eliminar la materia orgánica disuelta; además de coloidales por medio de la coagulación y floculación de la materia, este proceso consiste en el consumo de la materia orgánica por organismos específicos; en esta fase se puede usar lechos bacterianos o filtro biológicos tales como lagunas aireadas, biofiltros, fangos activos (Landi, 2018).

Como se ha podido evidenciar, la industria láctea es una de las actividades agroindustriales en las que el uso de agua es recurrente y en grandes volúmenes, especialmente en los procesos de limpieza, lavado de equipos, y procesos de producción. De igual forma, se conoce que estas aguas contienen altos niveles de demanda bioquímica de oxígeno, demanda química de oxígeno, así como nutrientes como el nitrógeno y fósforo que inhiben las funciones de la biota en los cuerpos de agua (Metcalf & Eddy, 2014; Samaniego & Núñez, 2022). Estudios han confirmado que las características fisicoquímicas de los efluentes de las industrias lácteas pueden exceder los umbrales normativos. Por ejemplo, en el estudio de Chariguaman et al. (2024), se determina que para este tipo de efluentes un tratamiento físico y químico no es suficiente para eliminar los indicadores altos de DBO y DQO, por ello se deben establecer tecnologías de tratamiento adecuadas para mitigar el contenido de contaminantes.

Los procesos anaeróbicos como los biorreactores o lechos fluidizados han demostrado alta eficiencia en la eliminación de contaminantes; sin embargo, estas tecnologías contienen limitaciones que dificultan su funcionalidad, como su estabilidad en condiciones operativas suelen ser muy sensibles a los cambios o compuestos inhibidores. Por lo cual es necesario realizar más investigaciones para que las plantas de tratamiento diseñadas a la industria láctea puedan eliminar los contaminantes presentes y mejorar con ello la calidad del agua (Ye & You Li, 2023).

A partir del análisis de las investigaciones, se pueden definir la existencia de varios vacíos que justifican la necesidad de realizar este estudio; como los sistemas dimensionados para caudales reales, la mayoría de las investigaciones documentan valores para pilotaje o ensayos controlados. De mismo modo, existen brechas entre caracterización y diseño técnico, esto se debe a que existen estudios en donde se evalúan los efluentes o las tecnologías para su aplicación, pero existe una escasez de estudios para proponer un diseño integral y optimizado para un tratamiento eficiente. Igualmente se evidencia un limitado cumplimiento normativo a nivel nacional que ocasiona la presencia de contaminantes en los cuerpos de agua.

La producción láctea es una de las actividades más representativas del país y un pilar importante para muchas economías locales. Sin embargo, detrás de su aporte al desarrollo agroindustrial existe una realidad poco visible: el manejo de los efluentes líquidos que se generan en los procesos de lavado, desinfección y embotellado. Las aguas, que contienen residuos o concentraciones orgánicos, grasas y productos químicos, pueden ser arrojados a los ríos o los sistemas de alcantarillado sin el tratamiento adecuado como lo norma la ley, afecta la calidad del agua y los ecosistemas que dependen de ella (WWAP, 2019; Landi, 2018).

En la normativa ambiental ecuatoriana, se establece límites claros para las descargas provenientes de las industrias, y el principal problema es que muchas plantas no cuentan con un

diagnóstico reciente ni con registros confiables sobre el estado de sus efluentes. Por lo que no se dispone con suficiente información sobre la eficiencia real de los sistemas de tratamiento que operan actualmente. Esta falta de conocimiento limita la capacidad de las empresas para mejorar sus prácticas y cumplir con sus responsabilidades ambientales (MAATE, 2021; Chávez, 2017).

Metodología

Materiales y Métodos

La presente investigación se realizó en base a un enfoque aplicado, descriptivo y analítico, orientado a una exploración cuantitativa, que evaluó técnicamente los efluentes industriales generados en la planta procesadora de productos lácteos y al diseño del sistema de tratamiento de aguas residuales. El estudio se desarrolla con un diseño no experimental de tipo transversal, debido a que los datos son recolectados y se analizan en diferentes periodos sin manipulación deliberada (Hernández-Sampieri & Mendoza, 2018).

Área de estudio

La investigación tomó como referencia una planta procesadora de productos lácteos ubicada en el Ecuador, esta planta se dedica a la recepción, procesamiento, pasteurización, envasado y distribución de los productos derivados de la leche. Actualmente la empresa cuenta con un sistema de tratamiento de aguas residuales, para la depuración de los efluentes generados en la producción.

El área de estudio comprende todas las zonas operativas, siendo:

- Área de recepción y almacenamiento.
- Área de pasteurización.
- Área de lavado y limpieza de los equipos.

- Área de envasado.
- Área de la planta de tratamiento de aguas residuales.

Las aguas residuales principalmente provienen de las actividades de lavado de los instrumentos usados en la realización de los productos lácteo

Materiales

Materiales de campo

- Recipientes plásticos para recolección de muestras.
- Etiquetas de identificación
- Equipo de protección
- Equipos de medición de parámetros físicos para el efluente.

Materiales y equipos de laboratorio

- Equipos e instrumentos para análisis físico, químicos y microbiológico
- Reactivos químicos
- Incubadoras, digestores, espectrofotómetros.

Método

La determinación del caudal de la planta de producción se realizó mediante un monitoreo directo en el colector principal de salida durante una jornada laboral completa de ocho horas, permitiendo capturar las variaciones hidráulicas de los ciclos de procesamiento y limpieza. Para asegurar la precisión de los datos, se utilizó un caudalímetro ultrasónico de tiempo de tránsito (no invasivo), el cual permitió registrar mediciones de flujo en tiempo real sin alterar la dinámica del efluente. Este equipo se instaló en un tramo recto de la tubería para evitar turbulencias, realizando

lecturas en intervalos de 30 minutos que arrojaron un caudal promedio de 10 m³/d. Bajo un criterio de seguridad operativa y para garantizar el cumplimiento del Acuerdo Ministerial 097-A ante posibles picos de producción o futuras expansiones, se aplicó un factor de mayoración de 1.5, estableciendo un caudal de diseño final de 15 m³/d.

Este procedimiento se ejecutó bajo los lineamientos de la norma NTE INEN 2169, asegurando que el dimensionamiento de la planta de tratamiento sea técnicamente robusto y capaz de mantener los tiempos de retención hidráulica necesarios para una depuración eficiente.

El diseño muestral se basó en la recolección de muestras del agua residual, considerando.

- Muestra de entrada (afluente): agua residual cruda, es decir, antes del tratamiento.

Las muestras fueron recolectadas siguiendo el procesamiento estandarizado, y etiquetado para el análisis en el laboratorio de cada muestra.

El análisis de los parámetros físico-químicos (pH, temperatura, DQO, DBO₅, sólidos suspendidos, aceites y grasas) fue realizado por un laboratorio acreditado por el Servicio de Acreditación Ecuatoriano (SAE), garantizando la competencia técnica y la validez de los resultados obtenidos. Los procedimientos analíticos se ejecutaron bajo los requisitos establecidos en el Acuerdo Ministerial No. 097-A, el cual reforma el Anexo 1 del Libro VI del régimen ambiental nacional, dictando los límites máximos permisibles de descarga y las metodologías de control obligatorias. Para la determinación de cada parámetro, se emplearon los métodos de ensayo del *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (Rice et al., 2023), tales como el método electrométrico para pH (SM 4500-H⁺ B), respirométrico para DBO₅ (SM 5210 B), reflujo cerrado para DQO (SM 5220 D) y extracción líquido-líquido para aceites y grasas (SM 5520 B/F), según lo referenciado en las Tablas 9 y 10 del mencionado Acuerdo.

La caracterización se fundamentó en una toma de muestra puntual única realizada en el colector de salida general de la planta de producción; este punto es estratégico ya que en él convergen todos los flujos residuales del proceso de leches blancas antes de su ingreso al sistema de tratamiento. Finalmente, el protocolo de muestreo, preservación y transporte se rigió bajo la norma NTE INEN 2169, incluyendo un riguroso sistema de etiquetado in situ que registra la identificación de la muestra, fecha, hora, punto de recolección y técnico responsable, asegurando la integridad y trazabilidad de los recipientes mantenidos en cadena de frío a 4°C hasta su procesamiento.

Análisis de datos y análisis estadístico

Los datos de caudal obtenidos en campo fueron procesados mediante un análisis estadístico descriptivo, utilizando las mediciones registradas por el caudalímetro ultrasónico en intervalos de 30 minutos. A partir de este conjunto de datos, se determinó un caudal promedio operativo de 10 m³/d, el cual representa la carga hidráulica base de la planta. Para la validación del diseño, se aplicó un análisis de variabilidad técnica mediante un factor de mayoración global de 1.5, permitiendo proyectar un caudal de diseño de 15 m³/d. Este cálculo integra las desviaciones típicas de los picos de vertido por limpiezas (CIP) y asegura un margen de seguridad operativa que garantiza los tiempos de retención necesarios para el cumplimiento del Acuerdo Ministerial 097-A.

Disponibilidad de datos y materiales

Los datos obtenidos para la investigación, incluidos los datos del laboratorio y los registrados en el campo, están disponibles previa solicitud, respetando las políticas internas de confidencialidad de la planta procesadora.

Resultados

Los registros obtenidos en el punto de vertido final de la planta de producción arrojaron un caudal promedio real de $10 \text{ m}^3/\text{d}$, con picos instantáneos que alcanzaron los $1.8 \text{ m}^3/\text{h}$. Al contrastar estos valores con los requerimientos de diseño de la PTAR, se estableció una capacidad operativa final de $15 \text{ m}^3/\text{d}$. Esta configuración asegura que el sistema funcione con un margen de seguridad del 50%, permitiendo absorber las fluctuaciones hidráulicas y garantizando el cumplimiento permanente de los límites de descarga del Acuerdo Ministerial 097-A.

Los resultados de los análisis fisicoquímicos realizados al efluente de ingreso evidencian que existe una alta carga de contaminantes, que se caracteriza de las aguas residuales producto de una actividad industrial.

Los valores mostrados en la tabla 2, muestran que el agua contiene altos niveles de concentración de materia orgánica, por los valores de DBO y DQO, lo cual justifica la necesidad de incorporar un sistema de tratamiento eficiente en la parte biológica. Así mismo se visualiza que las concentraciones de aceites y grasas, al igual que los sólidos suspendidos totales reflejan la incorporación de un sistema de pretratamiento y tratamiento primario que permita la reducción de los parámetros con concentraciones elevadas. Acuerdo Ministerial 097-A .

El pH, es uno de los valores que se mantiene dentro del rango establecido en la normativa ambiental vigente, por ende, en el proceso de tratamiento se debe considerar el control del pH, en

todas las etapas con el fin de garantizar que este parámetro físico se mantenga estable y no afecte las condiciones óptimas de los siguientes procesos de desinfección de los efluentes de las plantas del sector lácteo (Metcalf & Eddy, 2014).

En esta etapa se ha realizado el análisis y se ha identificado la caracterización del efluente de ingreso a la planta de tratamiento de agua, permite establecer una línea del grado de contaminación que presentan aguas residuales de los procesos, por ello a partir de estos datos se pueda establecer lineamientos claros para el diseño de una planta de tratamiento de aguas que cumpla con el tratamiento del efluente y la reducción de los contaminantes, cumpliendo con los límites permisibles establecidos en la ley.

El análisis de una industria del sector lácteo ha podido determinar e identificar cuáles son los puntos críticos, siendo uno de los más característicos el lavado de equipos que sucede durante los cambios de turno, lo que genera incrementos significativos, tanto en el caudal, como en la carga de los contaminantes en el efluente (Samaniego & Núñez, 2022).

Se ha determinado que durante estas actividades se produce un aumento en el uso de productos de origen químico para la limpieza, como es la sosa cáustica, lo cual contribuye al incremento del caudal, elevadas concentraciones de aceites y grasas en el efluente, con ello el aumento significativo de sólidos suspendidos y finalmente se puede presentar una variación en el pH del efluente (Landi, 2018).

Desde este análisis, se determina que estas descargas con altas concentraciones de contaminantes representan uno de los factores críticos para que la planta de tratamiento de aguas no tenga la eficiencia esperada, pudiendo afectar la estabilidad hídrica de la planta de tratamiento de aguas. En función de este análisis se ha determinado que dentro del proceso existen puntos críticos; el lavado de equipos, el manejo y dosificación de productos químicos de limpieza y la

descarga simultanea de aguas residuales en los cambios de turno (Aws, Jigar, Beszédes, & Kertész, 2023) .

La identificación de los puntos críticos permitió establecer la necesidad de medidas preventivas y correctivas en los procesos que provocan este tipo de comportamiento en los efluentes, así como la optimización de los procesos de lavado, implementar una dosificación adecuado y controlada de químicos y la programación de descargas hacia los sistemas de la planta de tratamiento de aguas, con el objeto de reducir los impactos negativos que se puedan presentar en el sistema de tratamiento.

La evaluación del grado de cumplimiento del sistema de tratamiento de la planta se ha realizado mediante la comparación de los parámetros fisicoquímicos del efluente con los límites establecidos en la normativa ambiental como se muestra en la tabla 2, para descarga de aguas residuales.

Tabla 2
Comparación de la calidad del efluente de ingreso frente a la normativa ecuatoriana del ambiente

Parámetro	Unidad	Efluente de ingreso	Límite normativo Ecuador	Cumple
Caudal promedio	m ³ /h	10	No regulado	–
Caudal pico	m ³ /h	15	No regulado	–
pH	UpH	6,5 – 8,5	6 – 9	Sí
DBO₅	mg/L	3950	100	No
DQO	mg/L	4250	250	No
Aceites y grasas	mg/L	1488	30	No

Sólidos suspendidos totales	mg/L	1490	100	No
(SST)				
Nitrógeno total	mg/L	64	No regulado*	—
Fósforo total	mg/L	11,3	No regulado*	—

Nota: en la tabla se presentan los parámetros evaluados en comparación con los límites regulados en el Ecuador. Fuente: Elaboración Propia

En la tabla 2, se realiza una comparación de los valores del efluente ingresado con los valores de los límites máximos permisibles establecidos en la norma ecuatoriana del AM 097 A, en donde se puede evidenciar que el agua residual industrial presenta niveles de contaminación altos que se encuentran asociados principalmente con la presencia de materia orgánica y sólidos totales que alteran la composición natural del agua.

Las concentraciones de DBO₅ se mantienen en un rango de entrada de 3950 mg/L y DQO 4250 mg/L, lo cual indica que superan ampliamente los valores permitidos, por la presencia de materia orgánica biodegradable y no biodegradable. Así mismo, los valores de aceites y grasas 1488 mg/L y sólidos suspendidos totales 1490 mg/L, exceden lo permitido, haciendo que el efluente con cumpla con las condiciones para una descarga directa al ambiente.

Si se compara el pH del efluente es el único valor que se encuentra dentro de los límites permisibles como se estableció con anterioridad; sin embargo, es puntal mencionar que este puede cambiar con las variaciones que existen en cuanto al uso de productos químicos durante el lavado de equipos, reforzando en la necesidad de implementar un sistema de homogenización y control del pH, en el proceso de tratamiento.

El sistema de tratamiento proyectado se dimensionó para alcanzar eficiencias de remoción escalonadas que garanticen un efluente final conforme a la normativa vigente. Se estima que la

trampa de grasas elimine inicialmente entre un 60% y 80% de los aceites y grasas suspendidos, reduciendo la carga de entrada al sistema DAF (Flotación por Aire Disuelto), el cual proyecta una remoción complementaria del 80% en sólidos suspendidos y un 40-50% de la DQO particulada mediante asistencia fisicoquímica. Finalmente, el Reactor Biológico MBBR está diseñado para degradar la carga orgánica soluble remanente con una eficiencia del 85-90% en DBO_5 , asegurando que el vertido final no supere los 100 mg/L exigidos en la Tabla 9 del Acuerdo Ministerial 097-A.

Las decisiones de un diseño se basan en la caracterización del efluente de la planta original, en donde se ha identificado los puntos críticos del proceso, como se muestra en la tabla 3, la evaluación del cumplimiento según los límites permisibles establecidos en la normativa ambiental ecuatoriana, se diseña una propuesta técnica de mejora en el sistema de tratamiento de aguas residuales. El sistema de tratamiento existente presenta una línea de proceso que no cumple con los lineamientos requeridos para el tratamiento de los efluentes.

Tabla 3
Diagnóstico de Puntos Críticos y Medidas de Diseño Propuestas.

Punto Identificado	Crítico	Impacto en el Efluente (Causa y Efecto)	Medida Propuesta en el Diseño
Lavado de equipos (Cambios de turno / CIP)		Causa: Descargas volumétricas masivas en periodos cortos. Efecto: Saturación de la capacidad hidráulica y reducción del tiempo de retención en las unidades de tratamiento.	Tanque de Igualación: Unidad dimensionada para amortiguar el flujo y estabilizar la carga antes del tratamiento.
Uso de Soda Cáustica y Ácidos (Procesos CIP)		Causa: Vertido de soluciones de limpieza con pH extremos. Efecto: Alteración del equilibrio químico que inhibe o elimina la biomasa activa del reactor biológico.	Sistema de Neutralización: Implementación de control automático de pH para mantener rangos óptimos (6.5 - 8.5).
Presencia de grasas y derivados lácteos		Causa: Arrastre de lípidos y sólidos orgánicos de la producción. Efecto: Obstrucción de ductos, formación de natas impermeables y reducción drástica de la transferencia de oxígeno.	Trampa de Grasas / Unidad DAF: Separación física de lípidos y sólidos flotantes previo a la etapa secundaria.
Alta Carga Orgánica (DBO ₅ / DQO)		Causa: Presencia de materia orgánica soluble y coloidal proveniente de la leche.	Reactor de Lodos Activados: Degradación de materia orgánica

	Efecto: Incumplimiento de los límites de descarga del Acuerdo Ministerial 097-A por agotamiento del oxígeno en el cuerpo receptor.	disuelta mediante sistemas de aireación extendida.
	Causa: Presencia de flóculos biológicos y residuos sólidos no sedimentados.	Sedimentador Secundario:
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	Efecto: Elevada turbidez y acumulación de lodos en el cuerpo receptor (río), afectando la vida acuática.	Clarificación del efluente final mediante decantación mecánica antes de su descarga.

Con base al contexto anterior, se ha propuesto un diseño integral que responde a las necesidades de la planta en cuanto a la remoción de los contaminantes, garantizando con ello la calidad del efluente para su descarga al ambiente y su recirculación dentro de la planta, para la limpieza.

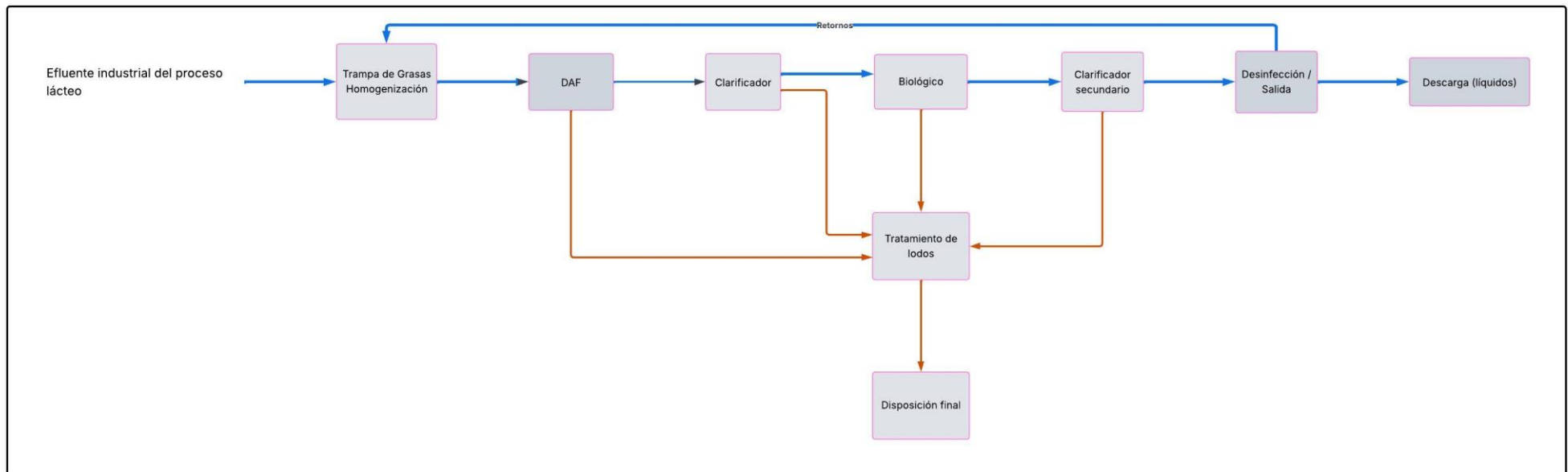
El diseño se concibe mediante un enfoque de tratamiento escalonado y progresivo, con lo que cada sección cumple con el objetivo destinado dentro de la línea de procesos, permitiendo así reducir gradualmente la carga contaminante que mantiene el efluente, a través de una integración de procesos físicos, químicos y biológicos, que han sido seleccionados en función de la eficiencia, confiabilidad operativa del proceso y compatibilidad con las características del encontradas en el agua residual de las plantas lácteas.

La propuesta técnica realizada se estructura como se muestra en la figura 2, en donde se mantienen los siguientes procesos:

- Pretratamiento.
- Homogenización

- Tratamiento primario
- Tratamiento biológico
- Clarificación secundaria
- Desinfección
- Almacenamiento de agua tratada
- Manejo de lodos

Figura 2 Diagrama de Flujo PTAR



Fuente: Elaboración propia

Memoria de Cálculo y Dimensionamiento del Sistema de Tratamiento de Agua

El diseño técnico de las unidades de proceso se fundamenta en los resultados de la caracterización físico-química del efluente crudo y un caudal de diseño de 15 m³/h. El sistema seleccionado corresponde a un proceso de Biorreactor de Lecho Móvil (MBBR), precedido por un sistema de Flotación por Aire Disuelto (DAF), el cual permite una alta eficiencia en la remoción de materia orgánica y grasas en espacios optimizados.

Determinación del Caudal de Diseño (Q_{dis})

Antes del dimensionamiento de las unidades de tratamiento (Trampa de Grasas, DAF y Reactor MBBR), se establece el caudal volumétrico de entrada. Este parámetro es fundamental para determinar los Tiempos de Residencia Hidráulica TRH y las tasas de carga superficial.

Fórmula:

$$Q = \frac{V_{total}}{t}$$

Donde:

- Q_{dis} : Caudal de diseño (m³/h).
- V_{total} : Volumen total de agua residual generado por jornada (m³).
- t : Tiempo de operación o bombeo (h).

Cálculo:

Considerando una generación diaria proyectada de efluentes de 120 m³ y una ventana de operación/bombeo de 8 h/día:

$$Q_{dis} = 120 \text{ m}^3/\text{d} / 8 \text{ h/d}$$

$$Q_{dis} = 15 \text{ m}^3/\text{h}$$

(Equivalente a 4.17 L/s)

Justificación:

Según Metcalf & Eddy (2014), el caudal de diseño en la industria láctea debe considerar no solo el promedio diario, sino los picos generados durante las fases de limpieza CIP (Clean-In-Place). Establecer el diseño en un rango de 10 a 15 m³/h permite absorber estas fluctuaciones sin comprometer la estabilidad de la biopelícula en los portadores del reactor biológico ni la eficiencia de remoción de grasas en las unidades primarias.

Determinación de la Relación de Biodegradabilidad

Antes del dimensionamiento, se establece la aptitud del vertido para ser tratado mediante procesos biológicos mediante la relación entre la demanda bioquímica y química de oxígeno.

- **Fórmula:**

$$Relacion = \frac{DBO5}{DQO}$$

- **Cálculo:** $\frac{3,950}{4,250} = 0,93$

- **Justificación:** Según Metcalf & Eddy (2014), una relación > 0.5 indica un efluente altamente biodegradable. El valor de 0.93 obtenido valida técnicamente el uso de reactores biológicos para este proyecto.

Cálculo de la Carga Orgánica Masiva (C_{org})

Representa la cantidad total de contaminante (en masa) que el sistema debe procesar diariamente. Es el dato de partida para el dimensionamiento del reactor.

- **Fórmula:**

$$Corg = Qprom \times DBO5$$

- **Variables:** Q_{prom} (Caudal promedio diario: 240 m³/día) y DBO₅ (Carga orgánica de ingreso: 3.95 kg/m³).
- **Desarrollo:** 240 m³/día X 3.95 kg/m³ = 948 kg DBO₅/día

Carga Orgánica Volumétrica de Diseño (L_v)

Representa la intensidad de carga aplicada al volumen del reactor. Para este proyecto, se ha seleccionado un valor de 5.78 kg DBO₅/m³ .d.

- **Justificación:** Según los criterios de Ødegaard (2006) para efluentes de la industria láctea, este valor se encuentra dentro del rango de "Alta Carga", permitiendo un diseño compacto que garantiza una remoción superior al 90% y el cumplimiento de los límites de descarga del Acuerdo Ministerial 097-A.

Dimensionamiento del Tanque Cárcamo de Bombeo

Esta unidad se diseña para garantizar un volumen útil que permita regular los ciclos de encendido y apagado de las bombas sumergibles, evitando el desgaste mecánico y asegurando un flujo controlado hacia el tratamiento. El volumen se calcula basándose en un Tiempo de Retención Hidráulica (TRH) de 1 hora para caudales promedio, permitiendo una amortiguación inicial y evitando la sedimentación de sólidos gruesos.

- **Fórmula de Volumen Útil (V_u):**

$$V_u = Q_{prom} \times TRH$$

- **Criterio de diseño:** TRH = 1 hora (60 min) para estabilización de bombeo.
- **Desarrollo:** $10 \text{ m}^3/\text{h} \times 1 \text{ h} = 10 \text{ m}^3$
- **Dimensiones Geométricas:** Se dimensionó con un TRH de 60 min para evitar arranques frecuentes de los motores. El tanque físico tiene una altura de 3.50 m, lo que permite un volumen total de 25.5 m^3 , dejando un margen de seguridad (borde libre) y espacio para la instalación sumergida de las bombas.

Dimensionamiento de la Trampa de Grasas

Unidad diseñada para separar grasas y aceites por diferencia de densidad. El volumen se dimensiona para permitir que las partículas de grasa alcancen la superficie antes de que el efluente salga de la unidad, considerando la velocidad de ascenso de los glóbulos de grasa láctea.

- **Fórmula:**

$$V = Q_{pico} \times TRH$$

- **Desarrollo:** $15 \text{ m}^3/\text{h} \times 0.76 \text{ h} = 11.42 \text{ m}^3$
- **Dimensiones Geométricas Detalladas:**

Para asegurar un régimen de flujo laminar y maximizar la captura de natas, se han definido las siguientes dimensiones:

- **Área Superficial (A_s):** Se definió un largo de 3.40 m y un ancho de 0.96 m, resultando en un área de 3.26 m^2 .
- *Verificación de Velocidad:* $v = Q/A = 15 / 3.26 = 4.6 \text{ m/h}$. (Cercano al criterio de 4 m/h, optimizado por la profundidad).

- **Altura Total (H):** Se estableció una altura de 3.50 m.
- **Configuración Interna:** El diseño contempla 3 cámaras separadas por baffles (tabiques).
 - **Cámara 1:** Recepción y disipación de energía cinética.
 - **Cámara 2:** Zona de flotación principal.
 - **Cámara 3:** Zona de clarificación y salida de efluente desgrasado.

Dimensionamiento del Tanque de Homogeneización

Unidad diseñada para estabilizar las fluctuaciones de carga orgánica y neutralizar el pH (ecualización) antes del tratamiento físico-químico y biológico. El volumen permite absorber las variaciones de los distintos turnos de producción.

- **Fórmula:**

$$V = Q_{prom} \times TRH$$

- **Desarrollo:** $10\text{m}^3/\text{h} \times 26.1\text{horas} = 261\text{m}^3$
- **Dimensiones:** Largo: 19.64 m, Ancho: 4.43 m, Altura Útil: 3.00 m.
- **Justificación:** Estas dimensiones se definieron para cubrir el Área Superficial de 87 m^2 necesaria para albergar el volumen de diseño de 261 m^3 a una profundidad operativa estándar de 3.00 metros. Un TRH de 26.1 horas garantiza que el efluente que llega al reactor biológico tenga una carga constante, evitando choques tóxicos por variaciones de pH o temperatura.

Sistema de Flotación por Aire Disuelto (DAF)

Unidad encargada de la remoción de sólidos suspendidos y grasas emulsionadas mediante microburbujas. El dimensionamiento se basa en la superficie necesaria para que los flóculos floten eficientemente.

- **Fórmula de Tasa de Carga Superficial (TCS):**

$$TCS = Q_{pico} / \text{Área}$$

- **Desarrollo:** $15, \text{m}^3/\text{h} / 1.5 \text{ m/h} = 10 \text{m}^2$ de área necesaria.
- **Dimensiones:** Largo: 5.00 m, Ancho: 2.00 m.
- **Justificación:** Se seleccionaron dimensiones de 5.00 m x 2.00 m para garantizar una TCS de 1.5 m/h. Este diseño rectangular maximiza el tiempo de contacto entre las microburbujas y la contaminación, permitiendo que las grasas floten de manera uniforme y sean removidas por el barredor mecánico antes del proceso biológico.

Dimensionamiento del Biorreactor MBBR

Unidad de tratamiento biológico de alta tasa diseñada para la remoción de materia orgánica mediante biomasa fija adherida a soportes plásticos (*carriers*). De acuerdo con los criterios de **Metcalf & Eddy (2014)**, este sistema permite gestionar altas cargas orgánicas volumétricas en espacios reducidos, optimizando la transferencia de sustrato y oxígeno.

- **Fórmula de Volumen del Reactor (V_{reac}):**

$$V_{\text{reac}} = \frac{C_{\text{org}}}{L_v}$$

- **Desarrollo:**

$$V_{\text{reac}} = 948 \text{ kg} / 5.78 \text{ kg/m}^3 = 163.86 \text{ m}^3$$

- **Dimensiones Geométricas:**

- **Largo:** 14.45 m
- **Ancho:** 3.78 m
- **Altura Útil:** 3.00 m

- **Justificación de Dimensiones:**

Las medidas de 14.45 m x 3.78 m se definieron para obtener el Área Superficial de 54.62 m² necesaria para albergar el volumen de diseño a una profundidad de 3.00 metros. Según la literatura técnica (Ødegaard, 2006), esta configuración junto con un Tiempo de Retención Hidráulica (TRH) de 10.9 horas garantiza una eficiencia de remoción superior al 90%, proporcionando la superficie específica necesaria para que la biomasa degrade la carga contaminante láctea de forma estable.

Dimensionamiento del Tanque de Lodos

Unidad encargada del almacenamiento y espesamiento gravitacional de los lodos biológicos excedentes y los lodos físico-químicos del DAF.

- **Fórmula de Volumen Geométrico:**

$$V = \text{Largo} \times \text{Ancho} \times \text{Alto}$$

- **Desarrollo:** 2.50 m x 3.78 m x 3.00 m = 28.34 m³

- **Justificación:** Según los criterios de Metcalf & Eddy (2014), el volumen de almacenamiento debe actuar como un pulmón operativo que absorba la producción de

lodos de 2 a 3 días, evitando que el sistema de deshidratación deba operar de forma continua. El ancho de 3.78 m y la altura de 3.00 m se seleccionaron para mantener la continuidad geométrica con el Biorreactor MBBR, permitiendo el uso de muros comunes en la construcción de hormigón armado. El largo de 2.50 m garantiza el volumen necesario para que el lodo sedimente por gravedad, permitiendo que el agua clarificada (sobrenadante) sea recirculada al inicio del proceso para su tratamiento.

Dosificación de Coagulante y Floculante

El proceso de coagulación-floculación es esencial para remover la carga orgánica no biodegradable y las grasas remanentes antes del tratamiento biológico. Se utiliza Policloruro de Aluminio (PAC) como coagulante y un Polímero Aniónico como floculante.

Cálculo de Consumo Químico

Fórmula:

$$C = \frac{Q_{dis} \times D}{1000}$$

Donde:

- C : Consumo de reactivo (kg/h).
- Q_{dis} : Caudal de diseño (15 m³/h).
- D : Dosis óptima obtenida en Jar Test (mg/L o g/m³).

Cálculo:

Policloruro de Aluminio (PAC - Coagulante):

- Dosis: D_{PAC} : 200 mg/L
- Cálculo: $(15 \text{ m}^3/\text{h} \times 200 \text{ g/m}^3) / 1000 = 3.0 \text{ kg/h}$

Polímero Aniónico (Floculante):

- Dosis: $D_{pol}: 2 \text{ mg/L}$
- Cálculo: $(15 \text{ m}^3/\text{h} \times 2 \text{ g/m}^3) / 1000 = 0.03 \text{ kg/h}$ (30 gramos por hora)

Justificación Técnica

Según los criterios de Metcalf & Eddy (2014) y Arias (2021), la dosificación de 200 mg/L de PAC y 2 mg/L de polímero se fundamenta en los resultados del Jar Test (Prueba de Jarras), procedimiento experimental que permite determinar la dosis óptima para la desestabilización de las micelas de grasa y proteínas lácteas mediante la neutralización de cargas electrostáticas. Esta dosificación técnica garantiza la formación de flóculos con alta resistencia mecánica y velocidad de flotación, logrando una remoción de aceites y grasas superior al 80% en el sistema DAF; esto es crítico para proteger el posterior Biorreactor MBBR, evitando que las grasas emulsionadas recubran los portadores (*carriers*) e inhiban la transferencia de oxígeno hacia el biofilm bacteriano, asegurando así la estabilidad operativa y el cumplimiento de los límites de descarga.

Análisis de Rendimiento y Balance de Lodos

El rendimiento del tanque no solo se mide por su capacidad de almacenamiento, sino por su eficiencia en la reducción de volumen mediante la separación del agua intersticial.

Cálculo de Carga de Sólidos (C_s):

Considerando la remoción en el DAF (lodos primarios con PAC) y la purga del MBBR (lodos secundarios), se estima una producción de lodo al 1% de sólidos:

- **Lodos Primarios (DAF):** Remoción de aceites, grasas y sólidos suspendidos (SST) ayudada por la coagulación con PAC.
- **Lodos Secundarios (MBBR):** Biomasa en exceso desprendida de los portadores.

Fórmula de Rendimiento de Espesamiento:

$$E = \left(\frac{Ventrada - V \text{ espesado}}{Ventrada} \right) \times 100$$

Resultados Esperados:

Mediante la sedimentación gravitacional en el tanque de 28.34 m³, se busca incrementar la concentración de sólidos del 1% al 3% - 4%. Esto representa una reducción del volumen de lodo de hasta el 60%, lo cual es crítico para disminuir los costos de disposición final.

Parámetros de Diseño Aplicados:

Tabla 4 Parámetros de Diseño y Rendimiento del Espesamiento de Lodos Mixtos

Parámetro	Valor Estimado	Justificación Técnica
Tasa de Carga de Sólidos	40 - 60 kg/m ² .d	Rango óptimo para lodos mixtos (Físico-químico + Biológico) según Metcalf & Eddy.
Eficiencia de Clarificación	85% - 95%	Porcentaje de sólidos que permanecen en el fondo, permitiendo un sobrenadante limpio.

Tiempo de Retención de
Lodos (TRL) 48 - 72 h

Tiempo necesario para la estabilización inicial y
compactación por peso propio.

Pretratamiento del agua residual

El diseño incorpora un sistema de pretratamiento, conformado por el cárcamo de bombeo, se entiende como un tanque de hormigón armado de $f' 210 \text{ kg/cm}^2$ con un revestimiento cilíndrico de polietileno de 12 mm con una capacidad de 10 m^3 , que servirá para la recepción del agua para su posterior tratamiento como se indica en la tabla 5. Continúa con la trampa de grasas, la cual estará compuesta por tres cámaras conectadas entre sí, en donde su principal función es separar las grasa y aceites del agua residual como se indica la tabla 6.

Tabla 5
Datos y dimensiones del tanque Cárcamo de bombeo

Equipo	TANQUE CARCAMO DE BOMBEO
Material de construcción	Hormigón Armado 210 kg/cm^2 con revestimiento de polietileno de 12mm
Caudal de diseño	Promedio de $10 \text{ m}^3/\text{h}$ y Pico de $15 \text{ m}^3/\text{h}$
Volumen de diseño	10 m^3
Forma	CILINDRICA
Dimensiones	Altura: 3.50 m Largo: 2,7 m Ancho: 2,7 m

Fuente: Elaboración propia

En este tratamiento también se ha considerado colocar un tanque de bombeo el cual será de hormigón armado, que será el encargado de almacenar el agua separada de las grasas. Del mismo modo, dentro de este tanque se encontrarán dos bombas sumergibles que se activarán de acuerdo con el nivel del agua. De allí pasará a un tamiz rotativo para la remoción de sólidos finos, o cribado fino, como uno de los puntos críticos era la limpieza de los equipos en este se propone; para su limpieza, el operador deberá realizar las siguientes acciones:

- Se abre la puerta abatible, y permite que los residuos adheridos a la malla puedan ser retirados y caigan sobre una funda. La funda no deberá superar los 25 kg de peso. Si la funda ya pesa 25 kg, se deberá cerrar la funda, gestionarla en el área de acopio de desechos; y colocar una nueva funda en caso de que aún queden residuos en la malla.
- Una vez recolectados los residuos de la malla, el operador cerrará la puerta abatible.
- Los residuos recolectados serán almacenados en la funda transparente, y entregados en el área de acopio de desechos.

La lógica de funcionamiento se encontrará enlazada a los ciclos de encendido de las bombas sumergibles del tanque de bombeo cuyo caudal se podrá visualizar a través del medidor-trasmisor de caudal. Dispondrá también de ciclos de limpieza, El control de estos ciclos se lo realizará a través del PLC.

- Encendido: El tamiz rotativo se encenderá al momento en el que al menos una de las bombas SP-002 A/B se encienda.
- Apagado: El tamiz rotativo se apagará cuando ambas bombas SP-002 A/B se encuentren apagadas.

Tabla 6
Datos y dimensiones del tanque para la trampa de grasas

Equipo	TRAMPA DE GRASAS
Material de construcción	Hormigón Armado 210 kg/cm ²
Caudal de diseño	Promedio de 10 m ³ /h y Pico de 15 m ³ /h
Volumen de diseño	11,42 m ³
Tiempo de retención hidráulico	22 min a caudal pico
Forma	Rectangular
Dimensiones	Altura: 3.50 m
	Largo: 3.40 m
	Ancho: 0,96 m
Incluye	3 compartimentos, comunicados por tubería de PVC de 200 mm (8")

Fuente: Elaboración propia

Homogenización y estabilización del efluente

Una vez finalizado el pretratamiento, se considera que el sistema debe ser completado con un tanque de homogeneización, en este punto el tanque considerado en el diseño permite con unas bombas igualar al caudal y la carga contaminante del efluente, con este paso se busca amortiguar las variaciones propias que pueden llegar a existir en el proceso. Este proceso de homogenización conseguirá a través de un sistema de aireación por blower, mantener en agitación constante el agua evitando que de esa manera se sedimenten los sólidos y se generen condiciones anaeróbicas en el

efluente, los datos y dimensiones del tanque homogeneizador se encuentra en la tabla 7. Este diseño considerado favorece la alimentación de las demás etapas posteriores, provocando de esa forma el incremento en la eficiencia de a los demás procesos.

Tabla 7
Datos y dimensiones del tanque de homogeneización

Equipo	TANQUE DE HOMOGENEIZACIÓN
Material de construcción	Hormigón Armado 210 kg/cm ²
Caudal de diseño	Promedio de 10 m ³ /h y Pico de 15 m ³ /h
Volumen de diseño	261 m ³
Forma	Rectangular
Dimensiones	Altura Útil: 3.00 m
	Largo: 19,64 m
	Ancho: 4,43 m

Fuente: Elaboración propia

Tratamiento primario

En esta fase del tratamiento primario se considera la implementación de un tanque que incluye una unidad compresor de aire que tendría una potencia 3 HP que permita saturar de aire el agua de recirculación, a una presión de aire de 0.5 MPa y las demás características se pueden observar en la tabla 7, que provoca liberación de microburbujas en la cámara de flotación, para la separación de partículas de aceites y sólidos en suspensión, ya que se adhieren a las burbujas a medida que suben a la superficie.

Tabla 8
Datos y dimensiones del compresor de aire

Equipo	COMPRESOR DE AIRE
Modelo	NB/T47052 - 2016
Motor	NORD – 2.20 KW/3PH/220v
Potencia	3 HP
Presión máxima	116 lbf/plg ²
Capacidad	95 L
Velocidad	2275 rpm
Conexión de descarga	¼"

Fuente: Elaboración propia

El diseño de esta sección incluye la dosificación controlada de coagulantes, floculantes y regulares de pH, con lo cual se permite la formación de flóculos estables que ascienden a la superficie para la remoción de los contaminantes. La incorporación de un tanque de floculación responde a la necesidad de mejorar la calidad del efluente que ingresa al siguiente tratamiento, sus características y dimensiones se encuentra en la tabla 8. La preparación y dosificación de químico se llevará de la siguiente manera:

- Regulador de pH: este químico solamente se utilizará en caso de que el pH del agua ingrese con menos de 6. La dosis se deberá manejar en campo, hasta que el pH se encuentre dentro de valores óptimos (7 a 8)
- Policloruro de Aluminio (PAC) : se prepara 1 saco de PAC en 250 L de agua, manteniendo la dosificadora al 30 % de su capacidad.

- Polímero aniónico: se ocupan 1500 g de polímero aniónico en 500 L de agua, y la bomba dosificadora se ocupa al 30 % de capacidad.

Tabla 9
Datos y dimensiones del tanque de flotación por aire difuso

Equipo	FLOTACIÓN POR AIRE DIFUSO
Material de construcción	Acero Inoxidable de 4mm
Capacidad	15 m ³ /h
forma	rectangular
Dimensiones	Altura: 2.20 m
	Largo: 5.00m
	Ancho: 2.00 m
Incluye	1 brazo raspador superior con banda de neopreno
Líneas hidráulicas	Línea de ingreso de agua a tratar: 3"
	Línea de salida de agua tratada: 4"
	Línea de salida de lodos flotantes: 3"
	Línea de salida de lodos sedimentables: 3"

Fuente: Elaboración propia

Tratamiento biológico

Para el diseño se ha pensado en incorporar un tratamiento biológico, a través de un biorreactor de lecho móvil, que es una tecnología que emplea lechos de soporte (carriers) que permanecen, a través de aireación, suspendidos en el agua. Los microorganismos se adhieren a los soportes y crecen sobre ellos. Estos soportes tienen una superficie de $3,000 \text{ m}^2/\text{m}^3$, razón porque se puede reducir el volumen, así como el tiempo de residencia, sus dimensiones y características se pueden observar en la tabla. Por la alta superficie se aumenta la cantidad de microorganismos en el proceso y se logra tener una capacidad de remoción extremadamente alta.

Tabla 10
Datos y dimensiones del tanque biorreactor

Equipo	TANQUE BIORREACTOR
Material de construcción	Hormigón Armado 210 kg/cm^2
Caudal de diseño	$15 \text{ m}^3/\text{h}$
Volumen de diseño	$163,86 \text{ m}^3$
Forma	Rectangular
Dimensiones	Altura: 3.00 m Largo: 14,45 m Ancho: 3,78 m
Líneas hidráulicas	Línea Tanque Biorreactor T-006 a Tanque de Calma T-007: 4"-PVC
Incluye	280 difusores de burbuja fina

Fuente: Elaboración propia

El agua ingresaría por gravedad desde el homogeneizador por la tubería de 4". En este tanque, se requiere que exista una mezcla a fin de permitir el mayor contacto de los microorganismos con la materia orgánica carbonácea; así como se requiere una alta concentración de oxígeno disuelto (> 2 ppm). Esto se logrará a través de 280 difusores de burbuja fina distribuidos sobre el fondo del tanque, que difunden el aire generado por los blowers a través de la línea neumática de 8 pulgadas, que se reduce a 3 pulgadas en el tanque de aireación. El agua una vez tratada, pasará por una malla de retención de lechos de soporte (carriers) hacia el pozo de calma, desde donde será bombeada por las bombas sumergibles, con el fin de eliminar el exceso de materia orgánica del agua.

Clarificación secundaria y separación de biomasa

Se considera de suma importancia que después del tratamiento biológico, se incorpore un sistema de clarificador secundario, en el cual se separará el lodo biológico formado en el tanque de aireación, del agua clarificada. La separación se da por dos procesos: sedimentación de partículas de lodo pesado y flotación de partículas de lodo liviano. El lodo que se obtendrá de esta fase pasará a un sistema de manejo de lodos, mientras que el agua clarificada pasará a un proceso de desinfección.

La preparación y dosificación de químico se llevará de la siguiente manera:

- Policloruro de Aluminio (PAC): se prepara 1 saco de PAC en 250 L de agua, manteniendo la dosificadora al 30% de su capacidad, sus datos y dimensiones se observa en la tabla 10.
- Polímero aniónico: se ocupan 1000 g de polímero aniónico en 500 L de agua, y la bomba dosificadora se ocupa al 30% de capacidad.

Tabla 11***Datos y dimensiones del tanque de almacenamiento de PAC Y POLÍMERO***

Equipo	TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE PAC Y POLÍMERO
Marca	S/N
Material	PVC
Capacidad	500 L
Forma	Cilíndrica

Fuente: Elaboración propia

Desinfección, almacenamiento y reutilización del agua tratada.

El diseño toma como principio la recirculación del agua tratada para ello el agua después del clarificador pasará a un tanque de desinfección, se realizará con el contacto de un agente desinfectante líquido, siendo el hipoclorito de sodio con el agua por un tiempo de contacto de 30 min, a fin de eliminar microorganismos patógenos. El agua desinfectada será finalmente descargada al ambiente, cumpliendo los límites máximos permisibles.

A ello, se ha contemplado realizar un tanque de almacenamiento de agua tratada, destinada a la reutilización de efluentes en actividades internadas de la planta, como la limpieza de máquinas, preparación de químicos para el tratamiento de esta, los datos y dimensiones se observan en la tabla 11.

Tabla 12
Datos y dimensiones del tanque de Hidroneumático

Equipo	TANQUE HIDRONEUMATICO
Motor	1HP HP/60Hz/3PH/110v
Presión máxima	6 bar
Capacidad	5-70 L/min
Hmax	50 m
Conexión de descarga	1"

Fuente: Elaboración propia

Manejo de lodos.

En la propuesta técnica se ha decidido incorporar un sistema que trate lodos, mediante un tanque de almacenamiento y un equipo de deshidratación; en este equipo, el lodo se flocula mezclándolo con polímero catiónico, y posteriormente pasa a los tornillos donde se deshidrata el lodo, con ello se controlará la eficiencia de deshidratación y reducirá el volumen final, dando una respuesta significativa al ambiente, con el tratamiento de los efluentes de la planta, los datos y dimensiones se encuentran en la tabla 12. Para los posibles problemas que se presenten en los procesos se ha propuesto una serie de respuestas en el anexo 2.

Tabla 13***Datos y dimensiones del tanque de lodos y del equipo deshidratador de lodos.***

Equipo	TANQUE DE LODOS
Material de construcción	Hormigón Armado 210 kg/cm ²
Volumen de diseño	28,34 m ³
Forma	Rectangular
Dimensión	Altura: 3.00 m Largo: 2,5 m Ancho: 3.78 m
Líneas hidráulicas asociadas	Línea salida de lodos DAF T-005 y línea salida de lodos Clarificador 7-008 : 3"-PVC
Hmax	50 m
Conexión de descarga	1"
Equipo	EQUIPO DESHIDRATADOR DE LODOS
TAG	DL-001
Material de construcción	Acero Inoxidable de 3mm
Capacidad	8 – 30 kg-DS/h
Potencia	0.81 KW
Motor de agitación	NORD de 0.50HP/3PH/220V de 1725 r/min
Motores de tornillo sin fin	2 NORD de 0,25HP/3PH/220v de 1705 r/min
Material de construcción	Acero Inoxidable de 3mm
Líneas hidráulicas	Línea de ingreso de lodo para tratar: 2" Línea de salida de agua de limpieza: 3" Línea de ingreso de agua de limpieza: ¾"

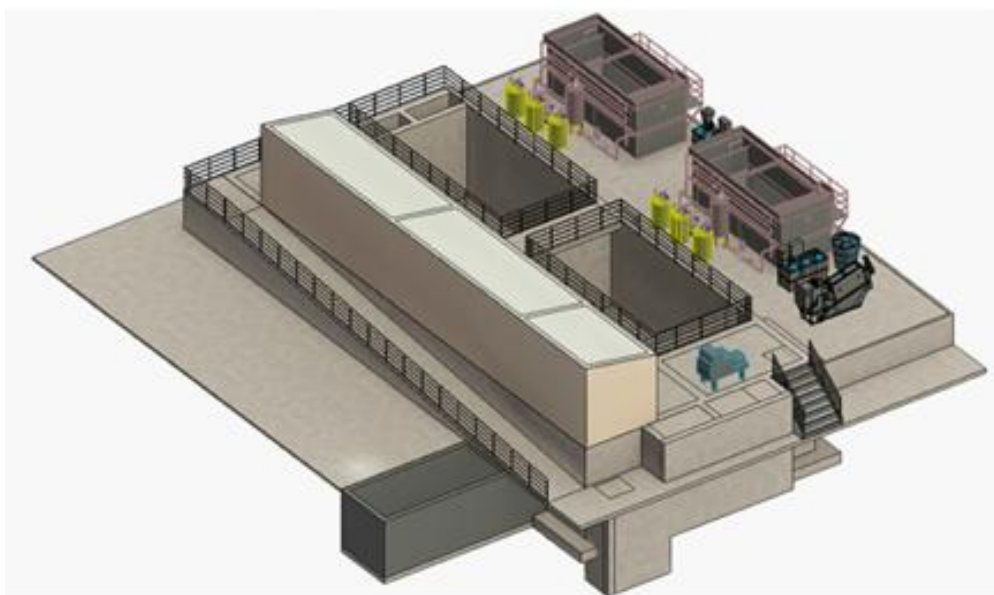
Fuente: Elaboración propia

Figura 3 Visualización del diseño de la planta en 3D



Fuente: Elaboración Propia

Figura 4 Vista del diseño de la planta en 3D, lateral.



Fuente: Elaboración Propia

Discusión de Resultados

A través de la inspección bibliográfica, se ha identificado que los efluentes de las industrias lácteas se caracterizan por mantener concentraciones elevadas de materia orgánica, debido a la presencia de aceites, grasas y residuos derivados principalmente de las actividades de limpieza y lavado de equipos. En este contexto, Mohammed Ali y Qarani Aziz (2024) enfatizan la importancia de diseñar plantas de tratamiento con tecnologías combinadas que integren etapas fisicoquímicas y biológicas, permitiendo abordar eficientemente efluentes con altas cargas orgánicas y grasas.

La literatura, en cuanto al diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales, muestras que integrar tanques homogeneizadores con tratamientos biológicos como los lechos móviles, mejora la eficiencia general del tratamiento de las aguas, es así que por ejemplo con este tipo de tecnologías, en estudios realizados para el tratamiento de aguas residuales sintéticas el desempeño en la remoción de aceites y grasas fue de 77,05% y 94,10% respectivamente, indicando que mantienen una buena capacidad para eliminación de los componentes orgánicos (Sazan & Shoukr, 2024) .

Así mismo, en el estudio para el tratamiento de agua se menciona que contar con un tanque homogeneizador y procesos de aireación contribuyen de manera significativa a la remoción de la materia orgánica y aceites, presentando valores de eficiencia superiores al 80%, lo cual refuerza que la elección de las tecnologías y su combinación en el proceso de tratamiento permite la eliminación de los contaminantes hidrofóbicos y sólidos (Paredes et al., 2025).

Diversas investigaciones, respaldan el uso de tecnologías avanzadas para el tratamiento de aguas residuales, como lo son los biofiltros la necesidad de un pretratamiento previo al tratamiento primario, lo cual se entiende como opciones más versátiles y efectivas para eliminar o remover cualquier clase de contaminantes de las aguas residuales, tal como se menciona en la investigación de Multicriteria Analysis of Decentralized Wastewater Treatment Technologies, la variabilidad de los caudales y cargas orgánicas no afecta al proceso de tratamiento por la aplicación de tecnologías combinadas para aguas residuales (Selerio, 2024).

Los estudios indican que la selección del tratamiento secundarios uno de los más importantes porque permite la remoción de mayor cantidad de materia orgánica, presente en aguas residuales, por lo que se menciona que es esencial realizar comparaciones de ventajas o desventajas que existen en los procesos de descomposición aeróbicos y anaeróbicos, para planear las tecnologías más útiles para la remoción, del mismo modo se debe realizar posterior al tratamiento biológico, procesos de sedimentación según lo mencionado por Marín y Núñez (2022).

Análisis de Viabilidad del Proyecto

Viabilidad Técnica

La viabilidad técnica del sistema propuesto se sustenta en la selección de tecnologías de alta eficiencia y bajo requerimiento de mantenimiento complejo, adecuadas específicamente para la industria láctea. El uso de un Reactor de Biopelícula de Lecho Móvil (MBBR) representa la solución técnica más robusta frente a las fluctuaciones de carga orgánica (DBO_5) y choques hidráulicos típicos del procesamiento de leche. A diferencia de los sistemas convencionales de lodos activados, la tecnología MBBR permite una alta concentración de biomasa especializada en

los carriers, lo que reduce el volumen necesario de los tanques y optimiza el espacio físico en la planta. Además, el diseño mecánico del tanque cárcamo con revestimiento de polietileno de 12 mm y la trampa de grasas de triple cámara aseguran una protección efectiva contra la corrosión y el taponamiento, garantizando una vida útil proyectada de la infraestructura superior a los veinte años. El sistema asegura el cumplimiento estricto de los límites máximos permisibles de descarga establecidos en la normativa ambiental vigente dentro del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente.

Viabilidad Económica

Desde la perspectiva económica, el proyecto demuestra ser una inversión sostenible y rentable para la empresa. Si bien el costo de inversión inicial contempla la adquisición de soportes plásticos y sistemas de aireación, este se compensa con una reducción significativa en los costos de operación y mantenimiento. La eficiencia del sistema permite una reducción considerable de lodos, lo que se traduce en un menor volumen producido en comparación con sistemas químicos-físicos y disminuye los gastos de gestión y disposición final. Asimismo, se logra un ahorro energético mediante la optimización del consumo eléctrico con el uso de sopladores controlados, dimensionados para los requerimientos reales de oxígeno del proceso.

La implementación de la planta de tratamiento de aguas residuales elimina la posibilidad de sanciones pecuniarias y clausuras por parte de las autoridades de control ambiental, cuyas multas podrían superar el costo total del proyecto, funcionando, así como una estrategia de prevención de riesgos financieros. Finalmente, la gestión responsable de los efluentes aporta un valor agregado al mejorar la imagen corporativa y facilitar la obtención de certificaciones de calidad y sellos verdes, permitiendo a la planta láctea competir en mercados con mayores exigencias ambientales y estándares internacionales de sostenibilidad.

Conclusiones

El análisis realizado al efluente de la empresa láctea evidencia que las actividades productivas de sector lechero generan agujas residuales con una elevada carga de contaminantes, principalmente asociado a la existencia de materia orgánica, con sólidos suspendidos, aceites y grasas; por ende, implementar un sistema de tratamiento diseñado para el efluente de la planta prioriza el control de las descargas de la empresa y minimiza los impactos sobre los cuerpos hídricos aledaños a la zona.

La caracterización de los efluentes industriales permitió evidenciar su alto potencial contaminante mediante la coexistencia de una carga orgánica soluble altamente biodegradable (relación 0.93) con una compleja matriz de grasas y aceites emulsionados. Esta dualidad físico-química sustenta la configuración de un sistema de tecnologías combinadas, donde el tratamiento primario mediante DAF (con dosificación de PAC) actúa como una barrera crítica de remoción de lípidos, permitiendo que el Biorreactor MBBR opere con máxima eficiencia en la degradación de nutrientes y materia orgánica disuelta. Esta sinergia tecnológica garantiza un rendimiento global superior, asegurando la estabilidad del proceso frente a las variaciones de carga caracterizadas en la industria láctea. En contraste con los parámetros de ingreso a los límites permisibles establecidos en la ley ecuatoriana, evidencian que no cumplen de manera significativa, lo que pone en manifiesto la insuficiencia de las descargas sin tratamiento o con sistemas inadecuados, por lo que refuerza la necesidad de efectuar un diseño del sistema de tratamiento de aguas de la planta en base a los criterios técnicos evaluados en el sitio.

El sistema de tratamiento propuesto en la investigación fundamenta la combinación de tecnologías desde el pretratamiento físico-químico, ecualización hidráulica y tratamiento

biológico, lo que constituye una alternativa técnica y sólida para la gestión de aguas residuales en industrias con altas cargas orgánicas. Los resultados permitieron aplicar criterios de diseño fundamentales, tales como el establecimiento de un caudal de diseño de 15 m³/h para absorber picos hidráulicos, el uso de tiempos de residencia hidráulica (TRH) optimizados en la trampa de grasas y el sistema DAF, y una tasa de carga orgánica volumétrica ajustada a la alta biodegradabilidad (0.93) del efluente real. Estos criterios, basados en los estándares de Metcalf & Eddy (2014) y los límites de descarga del Acuerdo Ministerial 097-A, permitieron dimensionar la planta de manera sostenible y operativa para asegurar el cumplimiento de la normativa ambiental vigente.

Recomendaciones

Se recomienda, una vez se ponga en marcha la planta, asegurar la correcta operación y mantenimiento de las unidades del sistema, tomando como base operativa la dosificación calculada de 200 mg/L de PAC y 2 mg/L de polímero. Estas dosis deben ser el punto de partida para el ajuste dinámico mediante pruebas de jarras según la variabilidad del efluente lácteo, permitiendo así elevar el nivel de remoción de contaminantes en el DAF y proteger la biomasa del MBBR. Asimismo, se sugiere implementar sistemas de monitoreo en tiempo real que ayuden a la gestión ambiental de la planta, minimizando con ello los impactos a los cuerpos hídricos y garantizando el cumplimiento del Acuerdo Ministerial 097a. Establecer medidas de prevención en la fuente, especialmente en los procesos o puntos críticos identificados en los procesos de lavado de equipos y el uso de productos químicos, con el fin de reducir la generación de cargas contaminantes. De igual forma, se debe gestionar sistemas de monitoreo continuo a los parámetros de pH, caudal y

demanda bioquímica de oxígeno para la toma de decisiones operativas y la detección temprana de fallas que pueden pasar en el sistema.

Realizar evaluaciones periódicas de la eficiencia del sistema rediseñado para el tratamiento de aguas, comparando los resultados de salidos con los límites permisibles establecidos en la ley.

Lista de referencias

- Aws, A., Jigar, E., Beszédes, S., & Kertész, S. (2023). Wastewater Treatment in the Dairy Industry from Classical Treatment to Promising Technologies: An Overview. *MDPI*, 11(7), 2133. doi:<https://doi.org/10.3390/pr11072133>
- Chariguaman, L., Gómez, L., Guerrero, L., & Moya, R. (2024). Tratamiento de Aguas Residuales Generadas en una Planta Procesadora de Lácteos en la Amazonia Ecuatoriana. *Reincisol*, 3(6), 2311-2331. doi:[https://doi.org/10.59282/reincisol.V3\(6\)2311-2331](https://doi.org/10.59282/reincisol.V3(6)2311-2331)
- Chávez, I. (2017). Diseño e implementación de un sistema de tratamiento de Aguas Residuales. *Dominio de ciencias*, 3, 536-560.
- Das, A., & Chen, L. (2024). A Review on Electrochemical Advanced Oxidation Treatment of Dairy Wastewater. *Environments*, 11(6), 124. doi:<https://doi.org/10.3390/environments11060124>
- Jones, W. L. (1990). *Biological wastewater treatment*. Marcel Dekker, Inc
- Jiménez, T., Guerra, B., Díaz, M., Sende, V., & Cabrera, A. (2023). Potencial de la aplicación de la tecnología de biorreactores de membranas en las industrias lácteas cubanas. *Tecnología Química*, 43(1). Retrieved from http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S2224-61852023000100173&script=sci_arttext&tlng=en
- Henze, M., van Loosdrecht, M. C., Ekama, G. A., & Brdjanovic, D. (2008). Biological Wastewater Treatment: Principles, Modelling and Design. IWA Publishing.
- Landi, M. (2018). *Evaluación técnica de la planta de tratamiento de aguas residuales de una industria láctea*. Retrieved from <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/19553>

Leche Gloria Ecuador. (2025). Diagrama de Flujo para Leche Blanca

León, J., Medina, C., & Segovia, E. (2020). Aplicación del método Foto-fenton para el tratamiento de aguas residuales en la industria láctea. *Ciencias técnicas y aplicadas*, 6(3), 785-801. doi:<http://dx.doi.org/10.23857/dc.v6i3.1316>

MAATE. (2021). Acuerdo Ministerial No. 097-A: Norma de Calidad Ambiental y de Descarga de Efluentes al Recurso Agua. Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica del Ecuador.

MAG. (2023). Informe del Sector Lácteo Ecuatoriano: Impacto Socioeconómico y Desarrollo Rural. Ministerio de Agricultura y Ganadería.

Marin, W., & Nuñez, M. (2022). Prediseño de una planta de tratamiento de aguas residuales de la empresa de lácteos el Pajonal. *InvestiGo, Revista Científica Multidisciplinaria*, 3(6), 79-99. Retrieved from <https://www.revistainvestigo.com/EditorInvestigo/index.php/hm/article/view/41/r6a7p>

Metcalf & Eddy, Inc. (2014). Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery (5th ed.). McGraw-Hill Education.

Mohammed Ali, S., & Qarani Aziz, S. (2024). Combining Dissolved Air Flotation (DAF) and Modified Moving Bed Biofilm Reactors (MMBBR) for Synthetic Oily Wastewater Treatment. *ResearchGate*, 26(4), 1-12. doi:<https://doi.org/10.30955/gnj.005451>

- Morales, K. (2021). *Uso de diatomeas como bioindicadoras de calidad de agua en la zona ganadera del río Tarqui*. Retrieved from <https://dspace.ucacue.edu.ec/handle/ucacue/10944>
- Ødegaard, H. (2006). *Innovations in wastewater treatment: the moving bed biofilm reactor*. Water Science and Technology, 53(9), 17-33.
- Paredes, L., Dávalos, H., Bejarano, D., Flores, R., & Lozano, F. (2025). Efficiency of a DAF System in Removing Organic Matter and Lipid Compounds from Municipal Effluent. *MDPI*, 17(24), 3474. Retrieved from <https://www.mdpi.com/2073-4441/17/24/3474>
- Quintuña, J., & Samaniego, M. (2021). *Evaluación fisicoquímica y microbiológica del agua potable de la planta potabilizadora del cantón Chordeleg*. Cuenca. Retrieved from <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/24847>
- Rice, E. W., Baird, R. B., & Eaton, A. D. (2023). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (24th ed.). American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA), Water Environment Federation (WEF).
- Samaniego, W., & Núñez, M. (2022). Prediseño de una planta de tratamiento de aguas residuales de la empresa de lácteos el Pajonal. *InvestiGO Revista Científica Multidisciplinaria*, 3(6), 79-99. doi:<https://doi.org/10.56519/rci.v3i6.70>
- Sazan, M., & Shoukr, A. (2024). Biofilm formation monitoring using SEM in synthetic wastewater pollutant removal by combination of DAF and modified MBBR. *Ain Shams Engineering Journal*, 15(5). doi:<https://doi.org/10.1016/j.asej.2024.102701>

- Selerio, E. (2024). Multicriteria Analysis of Decentralized Wastewater Treatment Technologies for the Philippines. *Submission history*, 2(2). Retrieved from <https://arxiv.org/abs/2410.22484>
- Tenelanda, R., & Muyulema, J. (2013). *Optimización de la unidad de floculación y calidad, microbiológica y físico-química del agua del sistema de abastecimiento de la parroquia Sinincay*. Retrieved from <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/4751>
- Tucunango, E. (2023). *Diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales de la industria "Láctea mi Velata", Chambo-Chimborazo*. Chimborazo. Retrieved from <https://dspace.esPOCH.edu.ec:8080/server/api/core/bitstreams/525f06de-77cf-4f00-b750-2c04e720785f/content>
- Vertil, R. (2016). *Determinación de parámetros físicos y químicos, y su influencia en las características organolépticas en la quebrada el Herrero, Soritor*. Retrieved from <https://repositorio.unsm.edu.pe/bitstream/handle/11458/2999/SANITARIA%20-%20Vertil%20Sanchez%20Requejo.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- WWAP (Programa Mundial de las Naciones Unidas de Evaluación de los Recursos Hídricos). (2019). Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2019: No dejar a nadie atrás. UNESCO.
- Ye, M., & You Li, Y. (2023). Methanogenic treatment of dairy wastewater: A review of current obstacles and new technological perspectives. *Science of The Total Environment*, 866(25), 161447. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161447>
- Leche Gloria Ecuador. (2025). Diagrama de Flujo para Leche Blanca

Anexo

Anexo 1 Guía para la solución de problemas en el Sistema

Tabla 14 Soluciones en problema en el pretratamiento

OBSERVACIONES	POSIBLES CAUSAS	SOLUCIONES
TRAMPA DE GRASA		
Ingreso de alto volumen de agua, que eleva el nivel de los tanques, provocando que regrese hacia las tuberías sanitarias	Ingreso instantáneo anómalo de agua	Revisar las conexiones de tubería aguas arriba de la trampa de grasas Revisar cualquier tipo de descarga anómala aguas arriba de la trampa de grasa
Se observa gran acumulación de grasa, que pasa hacia la cámara de desfogue	No se ha realizado la limpieza oportuna de la grasa acumulada	Realizar la limpieza de las grasas a través de un gestor ambiental autorizado
TAMIZ ROTATIVO		
El motor no arranca	El motor no se encuentra energizado	Chequear fusibles dañados y reemplazarlos
		Verificar cortocircuitos y repararlos
	Componentes mecánicos bloqueados	Verificar si hay materiales bloqueados, luego verificar si hay daños mecánicos en los componentes del equipo.
	Parámetros incorrectos de la alimentación de la red.	Verificar los parámetros incorrectos de la alimentación de la red.
Sobrecalentamiento del motorreductor	No hay suficiente aceite en el motorreductor	Verificar y corregir el tipo y nivel de aceite
Sonidos anómalos en el motor	Rodamientos o engranajes desgastados	Cambiar motor o reductor

Tabla 15 Soluciones en problema en el tratamiento biológico

DAF Y CLARIFICADOR SECUNDARIO		
No se está arrastrando los lodos flotantes hacia la línea de salida de lodos	Bandas de neopreno averiadas	Chequear que los pernos de las bandas de neopreno se encuentren ajustados Reemplazar las bandas de neopreno
	Avería en el motovariador	Chequear el funcionamiento del motovariador
No se observa floc y el agua sale turbia	Dosificación inadecuada de químicos	Revisar flujo de bombas, que no se encuentren tapadas
		Revisar que exista químico en los tanques
		Revisar estado de bombas dosificadoras
		Realizar prueba de jarras y ajustar dosis de químicos
	Aumento de flujo de agua	Ajustar el flujo al caudal de diseño
TANQUE AEROBIO		
Existen puntos muertos de agitación en el tanque aerobio	Difusores obstruidos o averiados	Vaciar y limpiar el tanque Reemplazar los difusores averiados
	Caída en flujo de aire desde blowers	Revisar los blowers Revisar línea de distribución de aire
El agua no circula	Taponamiento de malla con carriers	Reducir el caudal de ingreso a valores de diseño Aumentar la mezcla Destapar la malla

Tabla 16 Soluciones en problema en la deshidratación de lodos

DESHIDRATADOR DE LODOS		
Sonido anómalo motor floclador	Rodamiento desgastado	Reemplace rodamiento
Sonido anómalo motores tornillos	Rodamientos desgastados	Reemplace rodamientos
El lodo no se compacta, no floclula	Dosificación inadecuada de polímero catiónico	Verificar sistema de dosificación y preparación de polímero catiónico Realizar prueba de jarras para comprobar dosis
	Avería en motor del floclador	Revisar el motor del floclador
	Caudal elevado de lodo	Comprobar el caudal de lodo y ajustar a valor de diseño