

UNIVERSIDAD TECNICA NACIONAL

SEDE CENTRAL

**LICENCIATURA EN INGENIERÍA EN SALUD OCUPACIONAL Y
AMBIENTE**

Desarrollo de una propuesta de tratamiento primario para las aguas
residuales del proceso de elaboración de tubos metálicos en la
empresa Metales Flix

**Trabajo Final de Graduación presentada como requisito para
optar al grado de académico de Licenciatura en Ingeniería en
Salud Ocupacional y Ambiente.**

Estudiantes

Maricruz Álvarez Moya

Marilyn Chaves Arroyo

Alajuela, 07 de agosto, 2025

Hoja de Aprobación



Ingeniería en Salud Ocupacional y Ambiente
Sede Central

ACTA

En la ciudad de Alajuela, a los 07 días del mes de agosto del año 2025, estando presentes en la Sede Central de la Universidad Técnica Nacional, las siguientes personas: Sr. Javier Chacón Barrantes, Sr. Roberto Avilés Lazo, Sra. Gabriela Villalobos Porras, Sr. Agustín Rodríguez Carvajal y Sr. Carlos Mora Sánchez, en su condición de miembros del Tribunal Evaluador, para evaluar el Trabajo Final de Graduación, para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería en Salud Ocupacional y Ambiente de las personas estudiantes: Sra. Maricruz Álvarez Moya, cédula 111420519 y Marilyn Chaves Arroyo, cédula 401780979.

Reunido el Tribunal Evaluador y las aspirantes, se procedió a defender su Trabajo Final de graduación denominado **"Desarrollo de una propuesta de tratamiento primario para las aguas residuales del proceso de elaboración de tubos metálicos en la empresa Metales Flix"**, concluida la defensa del Trabajo Final de Graduación, el Tribunal Evaluador consideró que, de conformidad con la normativa en la materia, las personas estudiantes obtuvieron una calificación de nueve punto seis, cumpliendo con las exigencias requeridas para la aprobación del Trabajo Final de Graduación y le es conferido el grado de Licenciatura en Ingeniería en Salud Ocupacional y Ambiente.

Sra. Maricruz Álvarez Moya
Estudiante

Sra. Marilyn Chaves Arroyo
Estudiante

Sr. Javier Chacón Barrantes
Miembro del Tribunal
Tutor

Sra. Gabriela Villalobos
Porras
Miembro del Tribunal
Lectora

Sr. Agustín Rodríguez Carvajal
Miembro del Tribunal
Lector

Sr. Roberto Avilés Lazo
Miembro del Tribunal
Representante del Sector
Productivo

Sr. Carlos Mora Sánchez
Director de Carrera
Presidente Tribunal Evaluador

Dedicatoria

Dedicamos este trabajo con profundo cariño y gratitud a nuestras familias, quienes han sido el pilar esencial en nuestras vidas. Su amor incondicional, paciencia, comprensión y apoyo constante nos han acompañado en cada etapa de este camino académico. Gracias por creer en nosotros incluso en los momentos más difíciles, por motivarnos a seguir adelante y por enseñarnos, con su ejemplo, el valor del esfuerzo, la perseverancia y la responsabilidad. Este logro no habría sido posible sin su respaldo y confianza. Cada palabra escrita y cada meta alcanzada llevan implícito el reflejo de su compromiso y sacrificio. Esta meta es tan nuestra como de ustedes.

Agradecimientos

Agradecemos a Dios por habernos abierto cada una de las puertas que nos permitieron alcanzar un nuevo peldaño en nuestras vidas, y por concedernos la sabiduría y el entendimiento necesarios para lograr esta meta.

Expresamos nuestro más sincero agradecimiento a la empresa Metales Flix S.A., por brindarnos la oportunidad de desarrollar esta investigación relacionada con sus operaciones; por la confianza depositada en nuestro trabajo y por facilitarnos el acceso a la información necesaria. De manera especial, agradecemos al equipo del de Producción, cuyo apoyo fue fundamental durante el desarrollo del proyecto.

También queremos agradecer al ingeniero Javier Chacón Barrantes, nuestro tutor, por su acompañamiento, orientación y compromiso a lo largo de todo el proceso. Asimismo, extendemos nuestro reconocimiento a los profesores de la Universidad Técnica Nacional, quienes, con su conocimiento y dedicación, han contribuido significativamente a nuestra formación académica y profesional.

Finalmente, expresamos nuestro más profundo agradecimiento a nuestras familias, por su apoyo incondicional, su paciencia y por ser siempre nuestro mayor sostén en cada etapa de este camino.

Tabla de Contenidos

Hoja de Aprobación	ii
Dedicatoria.....	iii
Agradecimientos.....	iv
Lista de abreviaturas	x
Resumen	xi
Capítulo 1. Introducción.....	1
1.1. Planteamiento del problema.....	2
1.2. Justificación	5
1.3. Estado del arte.....	7
1.4. Objetivos de la investigación.....	11
1.4.1. Objetivo General.....	11
1.4.2. Objetivos Específicos	12
Capítulo 2. Marco teórico.....	13
2.1. Parámetros de Calidad del agua.....	16
2.2. Proceso coagulación-floculación para tratamiento de aguas residuales	21
2.3. Normativa.....	27
Capítulo 3. Estrategia metodológica	32
3.1. Enfoque de Investigación	32
3.2. Tipo de Investigación.....	33
3.3. Hipótesis o preguntas generadoras	33
3.4. Variables / Indicadores	34
3.5. Población / Muestra	34
3.6. Técnicas e instrumentos de Recolección de Información	35

3.7. Proceso de tabulación y análisis de datos	35
3.8. Obstáculos y dificultades	36
Capítulo 4. Caracterización de aguas residuales	37
4.1. Descripción del proceso productivo	37
4.1.1. Línea de Corte de Bobinas (<i>Slitter</i>)	37
4.1.2. Línea de Producción de Tubos.....	39
4.2. Diagrama de flujo del proceso de fabricación de tubos	48
4.3. Generación de aguas residuales en el proceso productivo	49
4.4. Composición química de los productos que contaminan el agua.	50
Capítulo 5. Diseño e implementación del proyecto.....	58
Capítulo 6. Análisis de resultados	66
6.1. Análisis de costos	73
Capítulo 7. Conclusiones y recomendaciones	75
7.1. Conclusiones.....	75
7.2. Recomendaciones	76
Bibliografía	78
Anexos	83
Anexo 1. Carta de Presentación.....	83
Anexo 2. Carta Filólogo	84
Anexo 3. Carta de autorización para uso y manejo de TFG.....	85
Anexo 4. Carta del Tutor aprobación proyecto.....	87
Anexo 5. Carta del Lectores aprobación proyecto	88
Anexo 6. Carta del Tutor aprobando anteproyecto	90
Anexo 7. Carta del Tutor y lectores avalando anteproyecto	91

Anexo 8. Carta de autorización de la institución	92
Anexo 9. Carta de aval profesora del curso	93
Anexo 10. Análisis de Laboratorio Agua Cruda	94
Anexo 11. Análisis de Laboratorio Agua Pretratada	95
Anexo 12. Ficha Técnica Floculante TS 08 FA.....	96
Anexo 13. Ficha Técnica Coagulante Z4500	97
Anexo 14. Ficha Técnica Coagulante WY220B	98
Anexo 15. Ficha Técnica Coagulante WY220C.....	99
Anexo 16. Cotización Tratamiento Aguas Residuales	100
Anexo 17. Cotización Coagulante y Floculante.....	102
Anexo 18. Diagrama causa- efecto	103
Anexo 19. Cronograma de Plan de Trabajo	104

Índice de Figuras

Figura 1. Diagrama de parámetros investigados	20
Figura 2. Representación de la estabilidad de los coloides presentes en el agua, cuando se adiciona un coagulante.....	22
Figura 3. Proceso de floculación	23
Figura 4. Ilustración esquemática del procedimiento de prueba de jarra y su evaluación	24
Figura 5. Desenrollador, cortadora y arrolladora	38
Figura 6. Desenrollador	39
Figura 7. Unión de flejes.....	39
Figura 8. Acumulador Horizontal	40
Figura 9. Formación inicial.....	41
Figura 10. Unión del tubo	42

Figura 11. Pileta de enfriamiento.....	43
Figura 12. Calibración de tubos.....	44
Figura 13. Formación final.....	44
Figura 14. Lubricación de tubos.....	45
Figura 15. Corte Final.....	46
Figura 16. Mesa de evacuación.....	46
Figura 17. Armado de paquetes.....	47
Figura 18. Diagrama de flujo del proceso.....	48
Figura 29. Medición llenada del Tanque.....	53
Figura 3. Medición viscosidad de Taladrina.....	54
Figura 21. Muestra de agua cruda.....	55
Figura 4. Preparación de Floculante.....	60
Figura 5. Prueba de jarras.....	61
Figura 24. Ronda 1 Coagulante Z4500.....	62
Figura 66. Ronda 3 Coagulante WY220C Fe.....	64
Figura 77. Muestra para pruebas de laboratorio.....	65

Índice de Tablas

Tabla 1.....	16
Tabla 2.....	17
Tabla 3.....	19
Tabla 4.....	25
Tabla 5 (continuación).....	26
Tabla 6.....	29
Tabla 7.....	34
Tabla 8.....	51
Tabla 9.....	53
Tabla 10.....	55
Tabla 11.....	60
Tabla 12.....	62
Tabla 13.....	63
Tabla 14.....	64
Tabla 15.....	66

Tabla 16	68
Tabla 17	72
Tabla 18	73
Tabla 19	74

Índice de Gráficos

Gráfico 1. Comparativa de porcentaje de remoción de DQO, según el coagulante utilizado	70
Gráfico 2. Porcentaje de reducción en los parámetros que cumplen posterior a la aplicación del método con el coagulante Z4500 con respecto al reglamento.....	70
Gráfico 3. Comparativa de metales pesados en mg/l entre el agua cruda y el agua una vez aplicado el método con el coagulante Z4500.....	71

Lista de abreviaturas

DBO	Demanda Bioquímica de Oxígeno
DQO	Demanda Química de Oxígeno
pH	Potencial de Hidrógeno
GyA	Grasas y Aceites
SSed	Sólidos Sedimentables
SST	Sólidos Suspendidos Totales
SAAM	Sustancias Activas al Azul de Metileno
MINAE	Ministerio de Ambiente y Energía
g/cm ³	Gramo entre centímetro cúbico
g/mol	Gramo entre mol
ppm	Partes por millón
mg/l	Miligramo entre litro
Al ₂ (SO ₄) ₃	Sulfato de Aluminio
PAC	Policloruro de Aluminio
FeCl ₃	Cloruro Férrico
FeSO ₄	Sulfato Ferroso
CaCl ₂	Cal
BaCl ₂	Cloruro de Bario
ml	Mililitros
g/l	Gramos entre litro
SSV	Sólidos Suspendidos Volátiles
PT	Intensidad de color amarillo en el agua
TP	Total de Fósforo
H	Hora
min	Minutos
rpm	Revoluciones por minuto
Al + Bentonita	Aluminio más Bentonita
ml/l	Mililitro entre litro
Agua - Taladrina	Disolución de Taladrina en agua
m ³	Metro cúbico
°	Grados Celsius
L	Litros
G	Gramos
kg	Kilogramo

Resumen

La investigación caracterizó y trató las aguas residuales generadas durante la recirculación en la fabricación de tubos metálicos en Metales Flix S.A. (Metales Flix, 2022), las cuales contenían niveles excesivos de DBO (53.000 mg/L), DQO (104.000 mg/L), SST (22.340 mg/L) y grasas y aceites (4.170 mg/L), superando los límites establecidos por el Reglamento N.º 33601-MINAE-S (2010). Se aplicó un enfoque mixto, de tipo descriptivo y exploratorio, mediante pruebas de jarras con coagulantes Z4500, WY220B (aluminio) y WY220C (hierro), siguiendo parámetros estandarizados (Fernández Collado & Batista Lucio, 2014).

El método de coagulación-floculación mostró altas eficiencias de remoción, coincidiendo con investigaciones previas (Cabrera et al., 2009; Bustamante López & Chacón Vera, 2024). El coagulante Z4500 alcanzó reducciones del 98.02% en DQO, y del 99.9% en SST, grasas, aceites e hidrocarburos; además, eliminó 96.15% de aluminio y 90% de zinc. A pesar de la alta remoción, la DQO final (2.060 mg/L) aún superó los límites normativos.

Desde el punto de vista económico, el tratamiento propuesto redujo en un 17.48% los costos frente a la opción de tratamiento externo, lo que lo posicionó como una alternativa técnica, económica y ambientalmente viable. El cumplimiento parcial de la normativa y la mejora en la calidad del efluente sugirieron la viabilidad de un reuso controlado, reafirmando la importancia de ajustar condiciones operativas para maximizar resultados (Pivokonský et al., 2022; Ghaly et al., 2007).

Capítulo 1. Introducción

La metalmecánica, como explica Morelos Gómez, Gómez-Yaspe, & De Jesús de Ávila-Suarez (2021), implica procesos de fabricación que utilizan metales y maquinaria especializada, incluyendo técnicas como soldadura, fresado y torneado. En concordancia, refiere Reyes Quezada & Cervantes Cabello (2023) que esta industria es crucial para sectores como automoción, construcción y energía, y ha sido transformada por avances tecnológicos que mejoran la eficiencia y precisión de los procesos.

En Costa Rica, el sector metalmeccánico contribuyó con \$692 millones al PIB en 2015, representando el 1.3% del total. Este sector incluye la fabricación de productos metálicos, reparación e instalación de maquinaria, y fabricación de equipo eléctrico (Procomer, 2020). Con 871 empresas registradas en 2016, representa el 18% de las empresas industriales formales. (Coto Arguello, 2017). Dentro de la industria metalmeccánica a nivel nacional destaca la empresa Metales Flix S.A., que ha evolucionado desde la producción de perfiles de hierro hasta la fabricación de tuberías industriales y otros productos. (Metales Flix, 2022)

La metalmeccánica utiliza metales como aluminio, cromo y zinc, que pueden contaminar ecosistemas si no se gestionan adecuadamente (López Badilla, Sánchez Ocampo, Paz Delgadillo, & Ling López, 2016). Así también refiere Molelos et al., (2021), los fluidos de corte usados en el proceso de fabricación de tuberías generan aguas residuales que contienen metales pesados, materia orgánica como hidrocarburos, grasas y aceites además de otros contaminantes, lo que puede causar problemas ambientales significativos.

La presente investigación busca comprobar la eficacia del método de tratamiento primario de Coagulación - Floculación para las aguas residuales generadas en el proceso de recirculación Metales Flix. El objetivo es reducir el impacto ambiental y mejorar la calidad del agua según la normativa, mediante un diagnóstico de las características de las aguas residuales y la aplicación de dicho método como parte de su tratamiento primario. Este enfoque es esencial para minimizar riesgos ambientales y económicos y mejorar la sostenibilidad de la empresa.

1.1. Planteamiento del problema

La metalmecánica comprende los procesos de fabricación que utilizan metales y maquinaria especializada para producir bienes, abarcando actividades como fundición, forja, mecanización y montaje mediante técnicas como soldadura, troquelado, fresado y torneado (Morelos et al., 2021; Reyes et al., 2023). Esta disciplina posibilita la fabricación precisa y eficiente de productos en sectores como automoción, construcción, energía y maquinaria industrial, mejorando su eficiencia, reduciendo tiempos de producción y adaptando sus procesos para ofrecer soluciones personalizadas y flexibles. (Reyes et al., 2023)

Según Coto (2017), en 2016 el sector metalmecánico representaba el 18% de las industrias formales, con 871 empresas, de las cuales 73 se dedicaban a la fabricación y fundición de metales comunes y metales preciosos.

Metales Flix S.A., empresa de capital costarricense, forma parte de las 73 compañías que fabrican metales en el país. Inició operaciones en la producción y comercialización de perfiles de hierro negro. Posteriormente, incorporó láminas lisas de hierro negro y galvanizado. (Metales Flix, 2022)

En el 2000 Metales Flix amplió su producción con tubería, Perfil Zeta y Metal Deck, innovando en el mercado. Actualmente, la empresa se ha consolidado como uno de los principales productores de acero para el sector construcción en Costa Rica. (Metales Flix, 2022)

Producto de la fabricación de estos materiales son generados residuos con metales pesados como plomo, cadmio, cromo, zinc, mercurio, entre otros, que contaminan suelos y aguas, representando un riesgo por su toxicidad, persistencia y capacidad de bioacumulación. (Pabón, Benítez, Sarria, & Gallo, 2020)

En Metales Flix los procesos de fabricación de tubería no son en seco; son procesos en los cuales como parte de la técnica de fabricación se incorpora la utilización del fluido de corte, esto a lo largo de la línea de producción mediante bombeo del líquido, el cual es esparcido sobre el filo de la herramienta de la máquina con el fin de que funcione como un sistema de enfriamiento y lubricación simultánea, evitando el riesgo de calentamiento excesivo de la herramienta y disminuir la corrosión, así como la preservación del material.

Este líquido recircula a lo largo de todo el proceso durante un periodo prolongado, ya que cuenta con características que permiten su durabilidad sin perder la efectividad del producto, y sin implicar un gasto económico mayor en el proceso de producción, esto provoca que haya un aumento de la carga de contaminantes en el agua, ya que adicional a los componentes del fluido de corte (sustancias orgánicas, oleosas), el agua contiene metales pesados propios de la composición de la estructura metálica tanto de hierro negro como galvanizado, tales como: plomo, cadmio, cromo, zinc, mercurio, entre otros; así como biocidas,

gérmenes nocivos y sustancias en descomposición, nitrosaminas, compuestos de boro, los cuales convierten estas aguas en residuos peligrosos.

La presencia de estos metales en los ecosistemas depende de las actividades humanas, como el cromo, que se utiliza ampliamente en la industria en áreas como el revestimiento plástico y la galvanoplastia de metales para la resistencia a la corrosión. (Pabón et al., 2020)

Las aguas residuales de las industrias de revestimiento de metales contienen grasas y aceites debido a los lubricantes empleados en el proceso de mecanizado. Al mezclarse con aguas de refrigeración pueden causar alteraciones en los cuerpos de agua. (Morales et al., 2022)

Actualmente, la industria metalmeccánica emplea fluidos de corte para enfriar, lubricar, limpiar y proteger contra la corrosión durante el mecanizado de piezas metálicas. Estos fluidos mejoran la productividad, extienden la vida útil de las herramientas y evitan la corrosión. (Cheng, Phipps, & Alkhaddar, 2005)

Estos fluidos mezclados con agua se suministran como concentrados y se diluyen con agua antes de su uso para producir una emulsión que incluye entre 2-10% por volumen de aceite en agua. (Chipasa, 2013)

Los fluidos de mezcla con agua generan los mayores problemas ambientales al agotarse. En el Reino Unido se usan varios tipos (macro emulsiones, semisintéticos, sintéticos), y la cantidad de residuos varía según el tamaño de cada empresa. (Chipasa, 2013)

El tratamiento de aguas residuales es un proceso indispensable en las industrias de manufactura, ya que los mismos evitan impactos ambientales tratando con sumo cuidado las descargas a cuerpos de agua cercanos, y

procurando en todo momento el cumplimiento de las normativas ambientales vigentes.

Para el tratamiento de los residuos generados de este material, el personal del área de producción de las tuberías determina visualmente qué tan cargado de suciedad está el agua, para verificar si es requerido reemplazar el producto. Una vez que se determina que se debe sustituir el producto, se realiza una limpieza en la línea de producción, para lo cual se utiliza un sistema de extracción mediante bombeo del agua. Este residuo se almacena de forma temporal en tanques plásticos, por un lapso de una semana mientras se coordina el inicio del proceso de tratamiento.

Estas aguas actualmente son tratadas mediante un Gestor externo, debido a que la empresa no cuenta con un sistema para gestionarlas. Además, a falta de análisis por parte de la empresa, se desconocen los porcentajes de contaminantes que las componen.

Actualmente, el gestor utiliza estos residuos para coprocesamiento, aprovechando su poder calorífico como combustible alternativo en industrias energéticas como cemento, acero, vidrio y generación eléctrica, reemplazando minerales y combustibles fósiles. (Ministerio de Salud, 2010)

1.2. Justificación

Con base en lo indicado en el apartado anterior, se ha identificado una necesidad en la empresa Metales Flix S.A. de gestionar un residuo derivado del proceso de fabricación de tuberías, que da pie a la presente investigación.

Por lo que se busca comprobar la eficacia del método primario Coagulación -

Floculación para que se pueda implementar internamente mediante un proceso seguro, eficiente, viable económicamente en donde su impacto económico sea menor que el del proceso actual, y además que se reduzca al máximo posible el impacto que se genera sobre el ambiente en cumplimiento con las regulaciones vigentes.

Sin dejar de lado alguna alternativa de reuso de esta agua en el proceso, es importante considerar que su reutilización no solo contribuye con la disminución de la huella hídrica y energética de la actividad industrial, sino que también aporta un significativo ahorro económico.

Reutilizar el agua en la industria es clave para reducir el consumo de agua potable, minimizar el impacto ambiental y cumplir con normativas. Esto permite ahorrar costos operativos, proteger ecosistemas y mejorar los procesos como enfriamiento y limpieza de maquinaria. (Manggle, 2023)

Actualmente la empresa no cuenta con todas las condiciones óptimas de almacenamiento para mantener estos productos por largos períodos. Los riesgos posibles que la empresa puede presentar derivados de la forma en la cual se trata actualmente estos desechos son:

- Riesgo de contaminación de los suelos y las fuentes de agua por derrame.
- Riesgo de incendio por almacenamiento prolongado de las tanquetas debido a la naturaleza inflamable, volátil y/o orgánica de los componentes
- Costos económicos elevados para la empresa debido al proceso de tratamiento actual que es tercerizado.

Por esta razón, es importante conocer a profundidad el método propuesto para el tratamiento primario adecuado para este tipo de aguas, lo que permitirá

validar su uso frente a los sistemas que se utilizan actualmente en la compañía, y realizar de esta forma una propuesta adecuada para el tratamiento primario de estas aguas residuales, tomando en consideración los impactos económicos que estos puedan generar y las afectaciones ambientales.

1.3. Estado del arte

Derivado de las actividades de los procesos industriales, el agua es un recurso que se ve afectado de manera considerable, debido a que de ella dependen infinidad de procesos involucrados para la fabricación de productos o como recurso provisor en las operaciones diarias en las industrias. Es por ello, que dentro de este mundo globalizado se hace necesario que se establezcan procedimientos aptos y adecuados para que se dé un uso y tratamiento idóneo de las aguas residuales de caracterización especial.

La contaminación ambiental por metales pesados se debe principalmente a actividades antropogénicas que están en contacto con este tipo de metales, como las llevadas a cabo en industrias metalúrgicas, agrícolas y manufactureras, así como a prácticas inadecuadas de almacenamiento y eliminación de residuos.

La metalurgia incluye la extracción, procesamiento y producción de metales y aleaciones, estas actividades pueden generar una gran cantidad de contaminantes que incluyen dentro de su composición ciertos metales pesados como el plomo, el mercurio, el cadmio, el arsénico, el cromo y el zinc.

Pabón et al., (2020) refiere: “Los metales pesados son elementos químicos de alta densidad (mayor a 4 g/cm^3), masa y peso atómico por encima de 20 g/mol y que son tóxicos en concentraciones bajas” (p. 9).

Los metales pesados, provenientes de fuentes naturales y humanas, son contaminantes tóxicos, no biodegradables y bioacumulables que afectan la salud humana, animal y vegetal. Se encuentran en agua, aire, suelo y alimentos, con efectos duraderos incluso a bajas concentraciones. (Quirós Bustos, Robles Chaves, Caballero Chavarría, & Calvo Brenes, 2022)

Según Tejada-Tovar, C., Villabona-Ortiz, Á., & Garcés-Jaraba, L (2015) establecen que “...la máxima concentración de iones de metales pesados en el agua debe estar en un rango de $0,01\text{-}1 \text{ ppm}$...”, sin embargo, en la actualidad se reportan concentraciones de iones de metales pesados hasta de 450 ppm en los efluentes (p.111).

Además de los metales pesados, estas aguas residuales suelen contener compuestos oleosos en concentraciones elevadas, lo que agrava aún más su impacto ambiental.

Tal como lo mencionan Adetunji & Ademola Olufolahan (2021) las aguas residuales con contenido de aceites e hidrocarburos generadas en la industria metalmecánica tienen su origen, principalmente, en el uso extensivo de lubricantes, aceites y refrigerantes aplicados durante operaciones como el mecanizado, corte y limpieza de componentes metálicos.

Durante estos procesos, dichos fluidos se mezclan con el agua de trabajo o de enjuague, dando lugar a efluentes con alto grado de contaminación que requieren un tratamiento especializado antes de su vertido final.

Estos efluentes industriales presentan una composición compleja, albergando aceites libres, emulsificados, hidrocarburos, metales pesados y diversos compuestos orgánicos.

Es esencial tratar el agua residual para que sea garantizada la calidad del recurso hídrico destinado al consumo humano e industrial. Según indica Pabón et al., (2020) dentro de los métodos comunes para el control de este tipo de metales en aguas residuales se utilizan: precipitación, óxido-reducción, intercambio iónico, filtración, tratamiento electroquímico, tecnologías de membrana y recuperación por evaporación, adsorción y bioadsorción, así como la coagulación-floculación que destaca por ser eficaz eliminando partículas en suspensión, materia orgánica y microorganismos. Todos ellos cuentan con ventajas y desventajas o limitaciones hablando en términos de eficiencia, costos, complejidad técnica y la combinación de varios métodos para lograr tratamientos previos del agua.

La coagulación-floculación, consiste en aglutinar partículas en pequeñas masas con un peso específico mayor al agua. Empleado para eliminar la turbidez, el color, reducir sustancias que generan sabor y olor, eliminar precipitados químicos en suspensión, separar bacterias, virus entre otros. (Lorenzo- Acosta, 2006)

La coagulación neutraliza la carga eléctrica de los coloides, eliminando las fuerzas repulsivas y facilitando la formación de microflóculos, que luego crecen en tamaño durante la floculación. Si el agua sigue turbia, el proceso puede ser incompleto. (Lorenzo- Acosta, 2006)

La prueba de jarras es un método de laboratorio ampliamente utilizado para simular y optimizar el proceso de coagulación-floculación en el tratamiento de agua. Permite evaluar la eficacia de diferentes coagulantes, ajustar su dosificación y

determinar las condiciones óptimas de mezcla y pH para maximizar la remoción de partículas y contaminantes. Esta prueba resulta fundamental para anticipar el comportamiento del tratamiento a escala real y optimizar el uso de productos químicos, manteniendo la calidad del agua tratada.

Los parámetros más críticos en las pruebas de jarras incluyen: Tipo y dosis de coagulante; pH de coagulación, que influye en la estabilidad y eficiencia del proceso; condiciones de mezcla, como intensidad y tiempo de mezcla. (Pivokonský, Novotná, Kateřina, Čermáková, Lenka, & Petříček, Jar, Radim, 2022). La intensidad y el tiempo de mezcla afectan el tamaño de los flóculos. La optimización del coagulante y pH se realiza en dos fases: ajuste del pH y pruebas progresivas. (Pivokonský et al., 2022). La prueba de jarras se consolida como una herramienta clave para optimizar este proceso, permitiendo el ajuste de estos parámetros para maximizar la eficiencia del tratamiento.

Diversos estudios en América Latina han aplicado esta metodología para mejorar la calidad de efluentes industriales. Por ejemplo, en Ecuador, Bustamante López & Chacón Vera (2024) evaluaron la tratabilidad de efluentes industriales generados por una empresa metalmeccánica, aplicando el proceso de coagulación-floculación, lograron disminuir significativamente diversos parámetros de contaminación, como DQO, aceites y metales. El sistema demostró ser eficaz y replicable en industrias con procesos similares.

Otro estudio desarrollado en el mismo país según Garcés Elsitdié (2012), diseñó una planta de tratamiento para efluentes metalmeccánicos en Ecuador, usando coagulación-floculación, logrando reducir significativamente SST y GyA, cumpliendo con la normativa ambiental vigente.

En México, según indica Ibarra Rodríguez (2020) demostró que la pectina de nopal elimina hasta el 90 % de metales pesados en aguas industriales, bajo condiciones óptimas de pH, agitación y dosis, con una homogenización eficiente en 15 min.

Por su parte Gil Morales, Rincón Rozo, & Salinas Garzón (2022) propusieron una alternativa biológica para la remoción de aceites y grasas mediante el uso de bacterias lipolíticas para reducir grasas en aguas oleosas, mostrando el potencial de combinar métodos biológicos con tecnologías convencionales en el tratamiento de efluentes.

En conjunto, estas investigaciones confirman que el proceso de coagulación-floculación, tanto con coagulantes tradicionales como con alternativas naturales, constituye una técnica efectiva para el tratamiento de aguas residuales oleosas, especialmente en sectores industriales como el metalmecánico. La evidencia demuestra que es posible alcanzar resultados significativos con tecnologías accesibles, replicables y adaptables al contexto local.

1.4. Objetivos de la investigación

1.4.1. Objetivo General

Proponer un tratamiento primario para las aguas residuales generadas en el proceso de recirculación en la fabricación de tubos metálicos de la empresa Metales Flix S.A, para la mitigación del impacto ambiental y cumplimiento con las regulaciones vigentes.

1.4.2. Objetivos Específicos

Diagnosticar las características fisicoquímicas e hidráulicas de las aguas residuales generadas del proceso de recirculación en la fabricación de tubería metálica de la empresa Metales Flix S.A, para el conocimiento de la composición y comportamiento de las aguas residuales.

Realizar ensayos experimentales utilizando diferentes tipos de coagulantes y diferentes concentraciones, con el fin de evaluar su efectividad en el proceso de Coagulación - Floculación.

Evaluar la eficiencia de remoción de contaminantes en cada tratamiento, mediante el análisis de parámetros de calidad de agua tratada, con el fin de determinar el coagulante y la concentración a proponer para el proceso de tratamiento primario.

Capítulo 2. Marco teórico

Se entiende por metalmecánica a aquellos procesos de fabricación que involucran metales y maquinaria especializada para la producción de bienes. (Morelos et al., 2021). La industria metalmecánica incluye procesos como fundición, forja, mecanizado y montaje, utilizando técnicas como soldadura, troquelado, fresado y torneado para conformar y ensamblar piezas metálicas en diversas aplicaciones industriales. (Reyes et al., p. 11)

La metalmecánica es una disciplina necesaria en la industria actual, que permite la fabricación de una gran cantidad de productos, desde estructuras metálicas hasta maquinaria pesada. Además, la metalmecánica juega un papel crucial en sectores como la automoción, la construcción, la energía y la fabricación de equipos industriales.

En la actualidad, la metalmecánica ha evolucionado gracias a los avances en tecnología y automatización. Esto ha permitido la implementación de procesos más eficientes y precisos, así como la reducción de los tiempos de producción. (Reyes et al., 2023). Además, la metalmecánica se ha adaptado a las demandas del mercado, ofreciendo soluciones personalizadas y flexibles a las necesidades de los clientes.

Investigaciones indican que las aleaciones empleadas en la industria metalmecánica comprenden aleaciones de aluminio y aleaciones para fabricación aditiva, todas ellas con propiedades sobresalientes como alta resistencia, ductilidad y resistencia a la corrosión. (Zhang, et al., 2018)

Estas aleaciones han sido fundamentales en el desarrollo de materiales avanzados para diversas aplicaciones industriales. Sin embargo, además de las aleaciones de aluminio y las utilizadas en fabricación aditiva, existen otros materiales metálicos ampliamente empleados por sus propiedades mecánicas y económicas.

El acero es el material metálico más usado hoy en día, compuesto habitualmente de hierro y carbono. Los aceros aleados incluyen también otros elementos como manganeso, silicio, níquel, cromo, molibdeno y vanadio, lo que les otorga gran versatilidad. (Bramfitt, 2015). Los aceros por definición son aleaciones compuestas principalmente de hierro con cantidades de carbono que oscilan entre 0.02% y 2.14% en masa. (Metalmecánica, 2024)

Si bien los aceros se valoran por sus propiedades estructurales y su amplia aplicación industrial, también es importante considerar los impactos ambientales relacionados a su uso, procesamiento de metales, entre otros.

Por lo que, es conocido que los metales pesados pueden tener efectos negativos significativos en los microorganismos, las plantas, los animales y los humanos, ocasionando consecuencias adversas a su salud. (Rahman & Singh, 2019)

En la industria metalmecánica para la fabricación de tubería se ven involucrados dentro de sus materiales el hierro negro y el hierro galvanizado, para comprender más a detalle, y según indica Aceropedia (2023) el hierro negro "... presenta una capa de óxido negro en su superficie...tiene niveles muy bajos de carbono y no recibe ningún tratamiento adicional en su superficie, lo que provoca que el acero se vuelva de color negro..." (párrafo 2). Por su parte, el hierro

galvanizado según se encuentra en Silver Tubos (2024) es un acero que ha sido “...recubierto con una capa de zinc, que se obtiene por inmersión en caliente, hecho con la finalidad de proporcionar una protección a la oxidación y en cierto porcentaje a la corrosión” (párrafo 2).

Como parte del proceso de fabricación de tubería se utilizan fluidos de corte que, como lo menciona Escuela de Post Grado Industrial (2020), éstos son “...líquidos especiales (aceitosos o acuosos) que se aplican, por medio de mangueras, sobre la zona de formación de la viruta de una operación de mecanizado. Su finalidad está en lubricar y eliminar el calor producido” (párrafo 1). Para una comprensión más técnica, podemos referimos al concepto mencionado según el Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (1994), indica que “Los fluidos de corte son productos líquidos de composición más o menos compleja, que se adicionan en el sistema pieza- herramienta- viruta de una operación de mecanizado, a fin de lubricar y eliminar el calor producido”.

Durante el proceso, los fluidos de corte se mezclan con diversas sustancias propias de la materia prima, lo que incrementa su carga contaminante. Según el Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales - Decreto 33601-MINAE-S (2010), esta carga se define como una “...masa contaminante vertida durante un período determinado”. Al finalizar el proceso, estos fluidos se convierten en aguas residuales, entendidas como aguas que han sido utilizadas y cuya composición ha sido alterada por la presencia de algún contaminante.

En este contexto, se puede deducir que la industria metalmecánica genera aguas residuales que contienen una amplia variedad de compuestos contaminantes. Con base en los estudios de Aghabalaei, Fazeli, Reza, & Abbas

(2013), Bustamante et al., (2024), Belenio Saénz et al., (2022), y Lizarazo Estupiñán & Villota Santamaría (2017), es posible identificar y caracterizar dichos componentes. La Tabla 1 presenta un resumen de los principales contaminantes hallados en estas investigaciones sobre aguas residuales provenientes de actividades metalmecánicas.

Tabla 1

Parámetros detectados en estudios investigados

Parámetros	Estudio 1	Estudio 2	Estudio 3	Estudio 4
pH	Detectado	Detectado	-	Detectado
DBO _{5,20}	Detectado	Detectado	Detectado	-
DQO	Detectado	Detectado	-	Detectado
Temperatura	Detectado	Detectado	-	-
GyA	-	Detectado	-	-
SST	-	Detectado	-	Detectado
Aluminio	-	Detectado	Detectado	-
Cobre	-	Detectado	Detectado	-
Cromo IV	-	Detectado	Detectado	-
Cromo III	-	Detectado	Detectado	-
Níquel	-	Detectado	-	-
Cadmio	-	Detectado	-	-
Plomo	-	Detectado	Detectado	-
Zinc	-	Detectado	Detectado	-

Fuente: Elaboración propia, 2025.

2.1. Parámetros de Calidad del agua

Las aguas se diferencian según parámetros que definen sus propiedades físicas y químicas, así como su impacto contaminante en el medio ambiente, por lo cual, para las actividades con aguas comunes o especiales, se deben considerar los siguientes parámetros universales:

Tabla 2*Parámetros detectados en estudios investigados*

Parámetro	Definición	Importancia del Control	Referencia
DBO	Mide la biodegradabilidad de la materia orgánica disuelta en el agua.	Indica el oxígeno necesario para oxidar la materia biodegradable y medir la contaminación.	(Simón, Penru, Guastalli, Llorens, & Baig, 2011)
DQO	Evalúa el contenido de materia orgánica oxidable con agentes químicos.	Determina la cantidad de materia orgánica e inorgánica que debe degradarse químicamente.	(Raffo Lecca & Ruiz Lizama, 2014)
pH	Mide la concentración de iones hidrógeno (H+) en una solución.	Afecta a los microorganismos; se busca un pH neutro en aguas residuales.	(Orozco Lab, 2023)
GyA	Componentes comestibles de origen vegetal o animal.	Altos niveles aumentan el DQO e impiden la degradación biológica.	(Potter & Hotchkiss, 1995)
SSed	Partículas suspendidas que sedimentan con el tiempo.	Controla la producción de lodos, reduciendo patógenos y malos olores.	(Barrios Guerrero & Martínez Zarante, 2023)
SST	Partículas orgánicas e inorgánicas mayores de 2 micrómetros.	Afectan la calidad del agua, disminuyen la claridad y oxígeno disuelto.	(Adhar, et al., 2022)
Metales Pesados	Elementos con densidad ≥ 5 g/cm ³ o número atómico > 20.	Evaluar su presencia es clave para medir la toxicidad del agua.	(Tirado Amador, González Martínez, Martínez Hernández, Wilches Vergara, & Celedón Suárez, 2015)
SAAM	Detectan productos como detergentes mediante reacción de coloración.	Indican la presencia de contaminantes en aguas residuales.	(Cruz Espina, 2022)
Temperatura	Mide el calor del agua, afectando otras propiedades fisicoquímicas.	Influye en la actividad de los microorganismos en el tratamiento de aguas.	(Paniagua Segovia, 2017)

Fuente: Elaboración propia, 2024.

A continuación, se detalla la Tabla 3 en donde se presentan los resultados obtenidos en diferentes estudios relacionados con el tratamiento de aguas residuales en la industria metalmeccánica y metalúrgica. Esta información se contrasta con los límites máximos permisibles establecidos en el Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales N.º 33601 MINAE (2010), con el fin de evaluar el grado de cumplimiento normativo y la efectividad de los métodos de tratamiento aplicados.

La Tabla 3 incluye parámetros fisicoquímicos relevantes como pH, DBO, DQO, sólidos, metales pesados, entre otros, los cuales permiten identificar los principales desafíos ambientales de este tipo de efluentes industriales y orientar el diseño de soluciones de tratamiento más eficaces,

Tabla 3*Comparativa de calidad del agua en estudios investigados*

Parámetros	Estudio 1	Estudio 2	Estudio 3	Estudio 4	Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales N° 33601	Análisis
pH	9,26	6.7	-	10,6	5 a 9	Solo el cuarto estudio con un valor 10.6 excede el límite superior permitido del pH
DBO_{5,20}	62,758 mg/l	6.3 mg/l	225,25	-	50 mg/l	Los estudios 1 y 3 superan el límite (62.758 y 225.25 mg/l), lo que indica alta carga orgánica no degradada.
DQO	540mg/l	93 mg/l	-	310 mg/l	150 mg/l	Todos los estudios superan el límite, especialmente el número 1 con un valor de 540 mg/l, indicando necesidad de tratamiento más avanzado.
Temperatura	26°C	-	-	-	15 °C ≤ T ≤ 40°C	Dentro del rango permitido.
GyA	-	3 mg/l	-	-	30 mg/l	Cumple ampliamente.
SST	-	785 mg/l	-	76 mg/l	50 mg/l	Ambos valores en los estudios 2 y 4 exceden el límite para el caso del estudio 2 con un valor de 785 mg/l es especialmente crítico.
Aluminio	-	0.008 mg/l	2.48 mg/l	-	5 mg/l	Cumple con el reglamento.
Cobre	-	0.07 mg/l	0.07 mg/l	-	0.5 mg/l	Dentro del límite.
Cromo IV	-	No detectable	0 mg/l	-	1.5 mg/l	Cumple.
Cromo III	-	-	0.15 mg/l	-	1.5 mg/l	Cumple.
Níquel	-	0.04 mg/l	-	-	1 mg/l	Cumple.
Cadmio	-	No detectable	-	-	0.1 mg/l	Cumple.
Plomo	-	0.3 mg/l	0 mg/l	-	0.5 mg/l	Cumple.
Zinc	-	19 mg/l	0.28 mg/l	-	5 mg/l	El estudio 2 supera considerablemente el límite permitido.

Fuente: Elaboración propia, 2024.

A continuación, se presenta un diagrama que resume los parámetros identificados en cada uno de los estudios investigados.

Diagrama de parámetros por estudios investigados



Figura 1. Diagrama de parámetros investigados

Fuente: Elaboración propia, 2025.

De acuerdo con la Figura 1, los parámetros en color rojo se encuentran fuera de cumplimiento de acuerdo con lo establecido en el Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales N° 33601 MINAE (2010).

El análisis comparativo de estos estudios sobre el tratamiento de aguas residuales en la industria metalmecánica y metalúrgica revela que, en general, los niveles de metales pesados se encuentran dentro de los límites máximos permisibles establecidos por el Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales N.º 33601 MINAE (2010). Sin embargo, se detecta un caso específico

de exceso significativo de zinc, lo cual indica la necesidad de aplicar tratamientos específicos que permitan su reducción efectiva antes del vertido.

Por otro lado, los parámetros como DBO, DQO y SST se presentan como los principales desafíos técnicos, ya que varios de los estudios reportan concentraciones superiores a las establecidas por la normativa. Esto evidencia una alta carga orgánica y presencia de sólidos, elementos que podrían generar impactos negativos en los cuerpos receptores si no se gestionan adecuadamente.

El pH también presenta desviaciones en ciertos casos, este parámetro debe ser estrictamente controlado, ya que fuera del rango normativo puede afectar tanto los ecosistemas acuáticos como la eficiencia de los procesos de tratamiento.

2.2. Proceso coagulación-floculación para tratamiento de aguas residuales

Cabrera Bermúdez, Fleites Ramírez, & Contreras Moya (2009) afirman:

“El proceso de coagulación–floculación consiste en añadir al agua o agua residual determinados aditivos químicos con el objetivo de favorecer la sedimentación de materia coloidal no sedimentable o aumentar la rapidez de sedimentación por la formación de flóculos” (p 65). En el proceso de coagulación se neutralizan esas cargas eléctricas, eliminando la repulsión entre partículas. (Lorenzo- Acosta, 2006). Según Cabrera et al., (2009), para eliminar estas partículas se realiza adicionando coagulantes, que desestabilizan las partículas coloidales cargadas eléctricamente.

Esta carga negativa que poseen la mayoría de los coloides les permite permanecer estables y dispersos gracias a la repulsión electrostática, que impide

su aglomeración y sedimentación natural al superar las fuerzas de atracción entre partículas. (Lorenzo- Acosta, 2006)

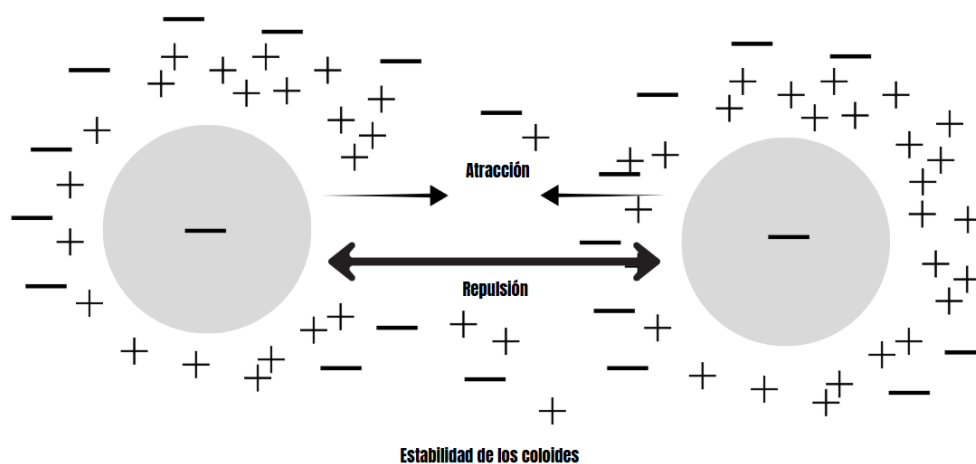


Figura 2. Representación de la estabilidad de los coloides presentes en el agua, cuando se adiciona un coagulante

Fuente: Tomada de Lorenzo- Acosta (2006)

La floculación por otra parte según Cabrera et al., (2009) se entiende como: “la unión entre los flóculos ya formados con el fin de aumentar su volumen y peso de forma que puedan decantar. Consiste en la captación mecánica de las partículas neutralizadas dando lugar a un entramado de sólidos de mayor volumen” (p 65).

Esta formación de flóculos ocurre cuando partículas desestabilizadas reducen su carga eléctrica, disminuyendo la repulsión y permitiendo la atracción por fuerzas de Van der Waals. (Lorenzo-Acosta, 2006). El coagulante inicia este proceso, pero necesita de una agitación lenta que favorezca su crecimiento y cohesión de los flóculos mediante colisiones entre partículas.

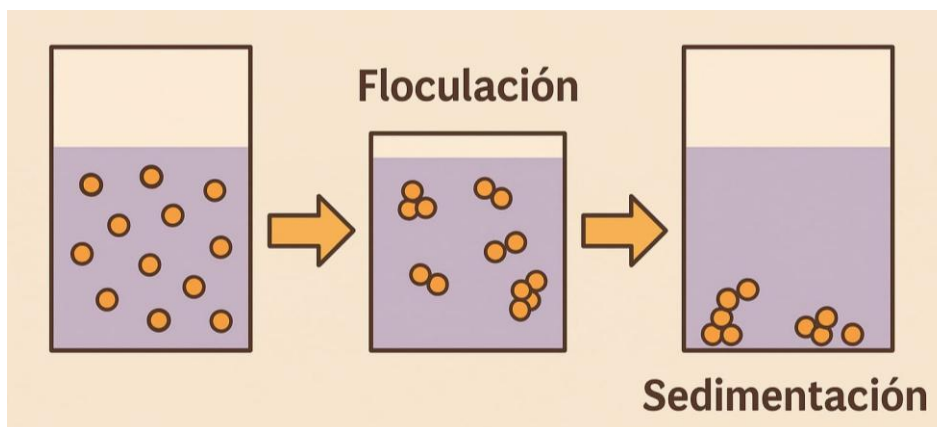


Figura 3. Proceso de floculación

Fuente: Tomado de Instituto del Agua (s.f.)

Para estudiar y optimizar este proceso en condiciones controladas, se recurre a métodos experimentales específicos, como la prueba de jarras, que permite evaluar la eficiencia de la coagulación y floculación en diversos escenarios de tratamiento de agua.

Las pruebas de jarras son un procedimiento realizado en entornos controlados de laboratorio, que permiten replicar las condiciones del proceso de coagulación-floculación para observar la formación de flóculos en el tratamiento de aguas. (Pivokonský et al., 2022)

Esta prueba establece la dosis óptima del coagulante y el valor de pH adecuado, la incorporación de coagulantes modifica el pH de la muestra, por lo que deben ser evaluados en conjunto bajo condiciones de agitación definidas. (Pivokonský et al., 2022)

Estas pruebas permiten determinar condiciones específicas del proceso, como controlar el tiempo y la velocidad, agitación rápida para coagulación y en la floculación lenta. Controlan la dosificación de coagulantes, reactivos químicos y la selección adecuada de coadyuvantes de floculación. (Pivokonský et al., 2022)

Este procedimiento es flexible y puede adaptarse según las necesidades de cada sistema de tratamiento, siendo especialmente útil al implementar nuevas tecnologías o rehabilitar infraestructuras existentes. (Pivokonský et al., 2022)

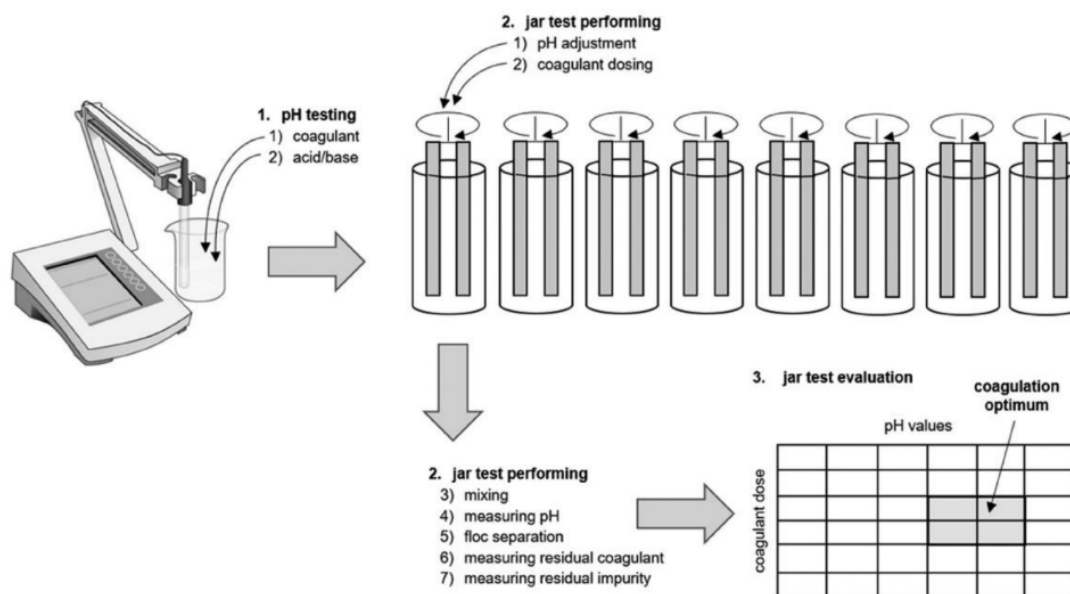


Figura 4. Ilustración esquemática del procedimiento de prueba de jarra y su evaluación

Fuente: Tomada de Pivokonský et al., (2022)

En esta investigación se han analizado diversos estudios enfocados en el proceso de coagulación-floculación, incluyendo el uso de Pruebas de Jarras para evaluar el tratamiento de aguas residuales resultado de distintas prácticas, como en el lavado de vehículos, estaciones de servicio, la industria textil y establecimientos de alimentos como sodas-comedor.

En la Tabla 4 se destacan aspectos como: tipos de Coagulantes utilizados entre los cuales se mencionan: $Al_2(SO_4)_3$, PAC, $FeCl_3$, $FeSO_4$, $CaCl_2$, $BaCl_2$, bentonita, quitosano, polímeros catiónicos y aniónicos.

Tabla 4

Comparativa de Investigación de Coagulación – Floculación mediante método de jarras

Nombre del documento	Bibliografía	Detalles	Coagulantes usados	Metodología prueba de Jarras	Dosis / Condición Óptima	Parámetros por estudiar	% de Remoción
International Journal of Environmental Analytical Chemistry	(Javad, y otros, 2020)	Tratamiento para tratar y reutilizar aguas residuales de lavado de vehículos	Al PAC FeCl ₃	Coagulación: 6,0-10,0 mg/l Floculación: 10,0 mg/l de ACH	Al entre 80 y 100 mg/l PAC 35 a 45 mg/l FeCl ₃ 25 mg/l	DQO, DBO, GyA, turbidez, SST, ST, Conductividad, pH	92% DQO 96% Turbidez
Treatment of Automobile Service Station Wastewater by Coagulation and Activated Sludge Process	(Mazumder & Mukherjee, 2011)	Contaminación de aguas residuales en estaciones de servicio	Al Al+Bentonita FeSO ₄ CaCl ₂ Bentonita	Coagulante: vaso de 500 ml Floculación: agitador de velocidad variable.	Grasas a 300 mg/l: Al 100 a 200 mg/l Al+Bentonita de 20 a 60 mg/l FeSO ₄ de 50 a 150 mg/l CaCl ₂ +Bentonita 100 a 300 mg/l Grasas a 600 mg/l: Al 100 a 400mg/l Al+Bentonita de 50 a 250 mg/l FeSO ₄ de 100 a 200 mg/l CaCl ₂ +Bentonita 100 a 500 mg/l	pH, ST, SST, DQO, GyA	100% Grasa de 300 mg/l , con: Al 200 mg/l y Al+Bentonita 60mg/l 100% Grasa de 600 mg/l con: FeSO ₄ 200 mg/l y CaCl ₂ + Bentonita 500 mg/l
Treatment of grease filter washwater by chemical coagulation	(Ghaly, Snow, & Faber, 2007)	Agua residual cruda de un filtro de grasa de aguas de lavado	Al ₂ (SO ₄) ₃ FeSO ₄ FeCl ₃	Concentración: 1,0 a 3,0 g/L. Agitación: 10 min Sedimentación: 6h	Al ₂ (SO ₄) ₃ 2 g/L FeSO ₄ 1 g/L FeCl ₃ 1 g/L	SST	Al₂(SO₄)₃ : 90% SST FeSO₄ : 28% SST FeCl₃ : 89% SST

Tabla 5 (continuación)

Comparativa de Investigación de Coagulación – Floculación mediante método de jarras

Nombre del documento	Bibliografía	Detalles	Coagulant es usados	Metodología prueba de Jarras	Dosis / Condición Óptima	Parámetros por estudiar	% de Remoción
Evaluación de un tratamiento físicoquímico en efluentes provenientes del lavado de vehículos para su reutilización	(Carrasquero, Terán, Mas, Colina, & Díaz, 2020)	Tratamiento físicoquímico para aguas residuales de lavado de vehículos	Al ₂ (SO ₄) ₃ FeCl ₃ CaCl ₂	Solución: 10.000mg/l Dosis: 0 a 850 mg/l Agitación: rápida 100 rpm por 1 min, lenta a 40 rpm por 15 min Sedimentación: 30 min Agitación: 100rpm, 3 min pH: con variación Floculación: 30rpm, 15 min Sedimentación: 30 min	Al ₂ (SO ₄) ₃ 700 mg/l FeCl ₃ 350 mg/l CaCl ₂ 350 mg/l	pH, Alcalinidad total, DBO, DQO, Turbidez, Color aparente, SST, SSV, PT	Al₂(SO₄)₃ : 93% color, 95% turbidez, 71% DQO y 97% ST FeCl₃ : 98% color, 99% Turbidez, 94% DQO y 95% ST CaCl₂ : 67% color, 87% Turbidez, 61% DQO y 94% ST
Selection of coagulant using jar test and analytic hierarchy process: A case study of Mazandaran textile wastewater	(Gholamreza, Hossein, Vahid, & Mostafa, 2018)	Selección del mejor coagulante para tratar el efluente de una fábrica textil	Al Cal FeCl ₃ FeSO ₄ BaCl ₂	pH: con variación Floculación: 30rpm, 15 min Sedimentación: 30 min	Al 1200 mg/l Cal 1000 mg/l FeCl ₃ 400 a 600 mg/l FeSO ₄ 800 mg/l BaCl ₂ 800 mg/l	Temperatura, pH, DBO, DQO, SST, Color, TP	Cal : 92% SST, 35% DQO, 70% color
Evaluation of industrial wastewater treatment with coagulants and polyelectrolyte as a coagulant aid	(Nabi Bidhendi, Torabian, Ehsani, & Razmkhah, 2007)	Remoción de contaminantes en efluentes textiles	Al Cal FeCl ₃ FeSO ₄ MgCl ₂	Solución: 500 cc de aguas con coagulante. Agitación: controlada. Sedimentación: 1h	Al 200 mg/l Cal 250 mg/l FeCl ₃ 200 mg/l FeSO ₄ 200 mg/l MgCl ₂ 500 mg/l	pH, DQO, Color, SST, Turbidez	Al : 93% DQO y 100% color Cal : 29% DQO y 2% color FeSO₄ : 93% DQO y 100% color FeCl₃ : 88% DQO y 100% color MgCl₂ : 97% DQO y 87% color
Proceso de coagulación-floculación de aguas residuales de sodas-comedor del Tecnológico de CR, Sede Central	(Leitón Aguero, 2017)	Aguas residuales en tres sodas del TEC diferente cantidad de almuerzos servidos.	Quitosano	Concentraciones: 6,0-10,0 mg/l Floculación: 10,0 mg/l de Hidroxiclورو de Aluminio	Quitosano 30 mg/l	pH, temperatura, turbiedad, SSed, GyA, SAAM y DQO.	ASETec : 93% GyA 100% Turbidez 99,38% SAAM TEC : 72% DQO Casa Luna : 99% SAAM

Fuente: Elaboración propia, 2024.

Los estudios investigados se basaron en la utilización de la metodología de la Prueba de Jarras, en donde se obtienen diferentes condiciones óptimas aplicando para cada caso tiempos de agitación, sedimentación y dosis ideal para obtener los mejores resultados de remoción de los contaminantes.

Las dosis de coagulantes varían dependiendo del tipo de agua residual y el coagulante empleado.

Los estudios midieron indicadores clave de calidad del agua, tales como: pH, temperatura, turbidez, color, SST, SSed, DQO, DBO, alcalinidad, conductividad, GyA, SAAM.

Se obtuvieron los niveles más altos de remoción de contaminantes mediante ciertas mezclas de coagulantes, con una eliminación de DQO: Hasta un 94% con FeCl_3 ; reducción de turbidez y color de hasta un 100% con FeSO_4 y PAC. Eliminación de grasas y aceites de hasta un 100% con Al + Bentonita y CaCl_2 + Bentonita y por último reducción de SST: 92% con cal y 90% con $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$.

Los estudios indican que la coagulación-floculación es un método altamente efectivo para la reducción de contaminantes en aguas residuales. La selección del coagulante óptimo depende de la composición del agua y del tipo de contaminante a eliminar. De manera general, el FeCl_3 , $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ y sus combinaciones con bentonita han presentado los mayores niveles de eficiencia en la remoción de materia orgánica, turbidez y sólidos en suspensión.

2.3. Normativa

Seguidamente se describe la legislación y reglamentación atinente en materia de aguas residuales.

Costa Rica dispone de un sistema legal ambiental bien establecido que

promueve la protección del entorno natural, dentro del cual se encuentra una regulación específica para la gestión de las aguas residuales. Estas normativas buscan asegurar que el tratamiento, vertido y posible reutilización de las aguas residuales se realicen de forma segura y ambientalmente responsable, minimizando los impactos negativos sobre los cuerpos receptores y la salud pública.

Dentro de este marco, destacan principalmente dos reglamentos que establecen los lineamientos técnicos y legales para el diseño, aprobación, operación y control de los sistemas de tratamiento en aguas residuales. A continuación, se describen brevemente:

Reglamento de Aprobación de Sistemas de Tratamiento de Agua Residuales No. 39887-S-MINAE

Este reglamento es aplicable en todos los sistemas de tratamiento en los cuales se utilizan métodos de depuración de aguas residuales ordinarias y especiales, las cuales son vertidas o reutilizadas a nivel nacional.

Por lo cual dicho reglamento establece los procedimientos y requisitos para la aprobación de estos sistemas de tratamiento de aguas residuales. Ahí se detallan las especificaciones técnicas que deben cumplir los sistemas de tratamiento para garantizar la adecuada depuración de aguas residuales antes de su vertido al ambiente.

Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales N.º 33601

Este reglamento regula el vertido y reuso de aguas residuales tratadas. Se establecen los límites y parámetros de calidad que deben cumplir las aguas residuales tratadas antes de ser vertidas o reutilizadas, con el objetivo de proteger la calidad de los cuerpos receptores y fomentar la reutilización sostenible del agua.

En dicho documento se establecen los parámetros de análisis obligatorio para vertidos de aguas residuales, aquí se indican cuáles son los análisis ya sean obligatorios o no que se le deben realizar a estas aguas antes de ser vertidas.

Así mismo, se especifican cuáles son los límites para el vertido de aguas residuales, los cuales se describen en la siguiente tabla:

Tabla 6

Límites máximos permisibles para los parámetros de aguas residuales vertidas en un cuerpo receptor

Parámetro	Límites según reglamento
Temperatura en el momento del muestreo	15 °C ≤ T ≤ 40°C
pH	5 a 9
DBO _{5,20}	50 mg/l
DQO	150 mg/l
SSed	1 ml/l
SST	50 mg/l
GyA	30 mg/l
SAAM	5 mg/l
Hidrocarburos totales	10 mg/l
Aluminio	5 mg/l
Cromo	1.5 mg/l
Zinc	5 mg/l

Fuente: Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales, decreto N.º 33601-MINAE-S, 2007

Además de estos reglamentos, existen otros instrumentos normativos que complementan el marco legal en esta materia, tales como:

Reglamento para la aplicación del Canon Ambiental por Vertidos, Decreto Ejecutivo N.º 34432-MINAE

Este reglamento, establece el pago de un canon por la descarga de aguas residuales al ambiente, con base en la carga contaminante vertida, con el fin de incentivar la mejora en la calidad de los efluentes.

Reglamento para el Manejo de Lodos provenientes de Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales, Decreto Ejecutivo N.º 37567-S-MINAE

Este reglamento regula el manejo, disposición y posible aprovechamiento de los lodos generados en los procesos de tratamiento, con el fin de evitar impactos adversos sobre el ambiente y la salud humana.

Aunque estos últimos reglamentos son importantes en el marco general de la gestión de aguas residuales, los que aplican directamente al presente proyecto son el Reglamento N.º 39887-S-MINAE y el Reglamento N.º 33601-MINAE-S, por lo que se detallan con mayor profundidad en esta sección.

Además del diseño y aprobación de los sistemas de tratamiento, la normativa nacional también exige el cumplimiento de obligaciones operacionales continuas por parte de los responsables de dichos sistemas. Entre ellas se encuentra la elaboración de reportes operacionales periódicos, los cuales deben contener información sobre el funcionamiento del sistema, los resultados de los análisis de calidad del agua tratada, el mantenimiento realizado y cualquier incidencia operacional relevante. Estos reportes son fundamentales para garantizar la trazabilidad y el cumplimiento normativo, además de facilitar el control por parte de las autoridades competentes como el MINAE y el Ministerio de Salud.

En lo que respecta al reuso de aguas residuales tratadas, el Reglamento de Vertido y Reuso (Decreto N.º 33601) contempla diferentes aplicaciones, siempre que se cumplan con los estándares de calidad específicos según el tipo de uso: agrícola, industrial, recarga de acuíferos, riego de áreas verdes, entre otros. Para cada tipo de reuso, se establecen parámetros adicionales que deben cumplirse — por ejemplo, en el caso de riego agrícola, se deben considerar niveles de coliformes fecales y otros contaminantes microbiológicos—, lo que implica la implementación de un monitoreo riguroso y constante.

El cumplimiento de estas disposiciones no solo asegura la protección ambiental y la salud pública, sino que también permite aprovechar el recurso hídrico de manera más eficiente, promoviendo una gestión sostenible del agua en un contexto de creciente presión sobre las fuentes hídricas.

Capítulo 3. Estrategia metodológica

3.1. Enfoque de Investigación

Esta investigación ha sido basada bajo un enfoque mixto, Fernández Collado y Batista Lucio (2014) refieren que son procesos de investigación sistemáticos que combinan datos cuantitativos y cualitativos, integrándolos para analizarlos y discutirlos en conjunto, generando meta-inferencias que permiten una comprensión más profunda del fenómeno estudiado.

Por ello, el propósito de una investigación mixta no es sustituir a la cuantitativa ni a la cualitativa, sino integrarlas y combinarlas, promoviendo su interacción y fortalecimiento mutuo.

En esta investigación la parte cualitativa estará dada por la comparación e interpretación de los documentos consultados, con el fin de evaluar preliminarmente la efectividad y atinencia al caso, para elegir el método que se evaluará cuantitativamente. Esto contribuirá a que se obtenga una visión más amplia de las posibles opciones y tener un mejor abordaje de la situación.

Por otra parte, los datos cuantitativos estarán basados en las mediciones que se realizarán para analizar la calidad de las aguas residuales derivadas del proceso de recirculación en la fabricación de tubería metálica de la empresa Metales Flix. Proponer un método efectivo para el tratamiento primario de aguas residuales personalizado y adaptado a las necesidades específicas de Metales Flix S.A en el proceso de fabricación de tubería metálica, que promueva la remoción de contaminantes acorde con las normativas ambientales pertinentes.

3.2. Tipo de Investigación

La investigación será Descriptiva y Exploratoria, mediante el muestreo de aguas, se determinará la presencia de ciertos elementos en el agua residual, con el objetivo de adquirir un conocimiento detallado y exhaustivo sobre el tema específico. Para lograr esto, se integrará la información proporcionada por la empresa con la investigación bibliográfica de diversos autores. Esta combinación permitirá un enfoque más completo del problema, y de ahí se derivarán las conclusiones resultantes del método propuesto.

3.3. Hipótesis o preguntas generadoras

En ese contexto la pregunta de la investigación se dirige a:

Hipótesis 1: Las aguas residuales generadas en el proceso de recirculación en la fabricación de tubería metálica en Metales Flix S.A. presentan altos niveles de metales pesados (como cromo, cobre y zinc) y grasas, aceites lubricantes y materia orgánica.

Hipótesis 2: La caracterización fisicoquímica de las aguas residuales permitirá identificar al menos una alternativa viable de tratamiento primario que puede reducir los contaminantes a niveles aceptables según las normativas ambientales.

Hipótesis 3: La implementación de un método de tratamiento primario de aguas residuales personalizado, basado en los resultados de la caracterización fisicoquímica, logrará una reducción de contaminantes significativa que permita cumplir la normativa en la mayoría de los parámetros y en los que no, facilitar la operación de un tratamiento final.

3.4. Variables / Indicadores

En esta sección se presentan las principales variables e indicadores que conforman la investigación, los cuales se resumen en la siguiente tabla.

Tabla 7

Análisis de Variables

Objetivo específico	Técnicas de recolección de información	Variable por medir	Análisis de la información
Diagnosticar las características fisicoquímicas e hidráulicas de las aguas residuales generadas del proceso de recirculación en la fabricación de tubería metálica de la empresa Metales Flix, para el conocimiento de la composición y comportamiento de las aguas residuales.	Realizar muestreos del agua residual tratada utilizando los diversos métodos propuestos.	Parámetros fisicoquímicos de la calidad del agua residual.	Analizar los datos obtenidos de las pruebas de laboratorio en relación con lo indicado en el Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales N.º 33601. Identificar los parámetros que superan los límites establecidos y se examina la naturaleza de los contaminantes
Realizar ensayos experimentales utilizando diferentes tipos de coagulantes y diferentes concentraciones, con el fin de evaluar su efectividad en el proceso de Coagulación - Floculación.	Diseño y ejecución de pruebas de jarras con distintos coagulantes y concentraciones.	Tipo de coagulante, dosis aplicada, condiciones de agitación, tiempo de sedimentación.	Comparación del comportamiento de cada coagulante y dosis en términos de formación de flóculos y clarificación; selección preliminar de condiciones óptimas.
Evaluar la eficiencia de remoción de contaminantes en cada tratamiento, mediante el análisis de parámetros de calidad de agua tratada, con el fin de determinar el coagulante y la concentración a proponer para el proceso de tratamiento primario.	Medición de parámetros antes y después del tratamiento experimental; análisis de laboratorio.	DQO, GyA, hidrocarburos, turbidez, color, SST, % de remoción por parámetro.	Cálculo del porcentaje de remoción de cada parámetro; evaluación comparativa entre tratamientos; determinación del coagulante y dosis óptimos según criterios de eficiencia y cumplimiento normativo.

Fuente: Elaboración propia, 2024.

3.5. Población / Muestra

La población está determinada por la totalidad de las aguas residuales generadas durante el segundo semestre del año 2024 en el proceso de fabricación de tuberías metálicas en Metales Flix S.A., ubicada en la provincia de Alajuela,

cantón San Rafael, durante el periodo de 2024.

Para obtener una muestra compuesta significativa de las aguas residuales generadas durante el proceso, se seguirá un procedimiento que garantice la representatividad de la muestra, considerando la proporción o alícuota adecuada de la muestra, así como el intervalo del tiempo a utilizar para la toma y la duración que abarca el proceso.

Para la presente investigación, se determinará únicamente una muestra y no la población total; esta muestra se estimará durante el desarrollo del trabajo.

3.6. Técnicas e instrumentos de Recolección de Información

Aquí se describen las dos principales formas de recolección de datos que se utilizarán en la presente investigación. A través de estos instrumentos, se busca obtener resultados precisos y claros sobre la situación en el proceso actual.

a. Análisis de ensayos de laboratorio: Para asegurar la validez de los resultados de los ensayos, se llevarán a cabo mediante un laboratorio acreditado. Para ello, se realizará una serie de ensayos de las aguas residuales generadas durante el proceso de recirculación en la fabricación de tubos metálicos. Estos análisis se documentarán utilizando tablas y gráficos comparativos.

b. Consulta bibliográfica: Se realizarán consultas en artículos, revistas científicas y repositorios relevantes sobre el tratamiento primario de aguas residuales seleccionado.

3.7. Proceso de tabulación y análisis de datos

Para el procesamiento de la información se utilizarán tablas comparativas con la información recolectada, según la investigación realizada por medio de consulta bibliográfica, obtenida de revistas y artículos científicos acerca del método

seleccionado para el tratamiento primario en la disposición final en el proceso de recirculación, en la fabricación de tubos metálicos de las aguas residuales generadas.

Una vez se tomen las muestras de la composición del agua residual generada en el proceso de recirculación en la fabricación de tubos metálicos, se realizarán diferentes corridas con el método seleccionado, para seguidamente analizar los resultados obtenidos y por medio de una tabla comparativa valorar los resultados de los diferentes análisis realizados y así elegir la mejor dosis resultante.

3.8. Obstáculos y dificultades

Durante el desarrollo de la investigación nos encontramos con un obstáculo relevante que incidió directamente en el avance del trabajo de campo: la necesidad de esperar a que se llevara a cabo la programación de la limpieza del tanque. Este aspecto, que en un inicio podría considerarse un procedimiento rutinario de mantenimiento, adquirió un papel determinante en la logística del proyecto, ya que condicionó el momento y las circunstancias bajo las cuales era posible obtener la muestra requerida.

La recolección de la muestra debía realizarse en condiciones que reflejaran con la mayor fidelidad posible el estado real del tanque durante su operación habitual.

Capítulo 4. Caracterización de aguas residuales

En 1990, Metales Flix S.A. inicia especializándose en la producción y distribución de perfiles de hierro negro tipo perling. La empresa ha diversificado sus operaciones, incorporando la venta y el corte de láminas lisas de hierro negro y galvanizado. (Metales Flix S.A, 2022)

En el año 2000, amplió su portafolio fabricando tubería industrial y estructural, integró nuevas líneas como el Perfil Zeta y el Metal Deck. Actualmente, Metales Flix es uno de los principales fabricantes de acero para la industria de la construcción. (Metales Flix S.A, 2022)

En 2022, como parte de su compromiso con la sostenibilidad, implementó la norma ISO 50001:2018, fortaleciendo su sistema de gestión energética y mejorando la eficiencia operativa y ambiental. (Metales Flix S.A, 2022)

4.1. Descripción del proceso productivo

En la siguiente sección se describen las etapas de producción de la empresa Metales Flix en la fabricación de tuberías metálica, así como el proceso mediante el cual los componentes de los materiales contribuyen a la contaminación del agua.

4.1.1. Línea de Corte de Bobinas (*Slitter*)

La máquina *Slitter* es un dispositivo de corte que se utiliza para dividir bobinas de metal de diversos materiales en rollos de diferentes anchos. Ofrece dos tipos de corte: el corte de registro y el corte de rebobinado.

La máquina se compone de tres partes principales: el desenrollador, la cortadora y el arrollador. En primer lugar, la bobina pasa por el desenrollador, donde

se desenrolla y se sostiene de manera estable, permitiendo solo el giro necesario y regulando la tensión del material mediante el frenado del giro.

Posteriormente el material pasa por las cuchillas, que lo cortan en tiras más angostas de acuerdo con la programación seleccionada para el producto final.

Finalmente, las tiras se rebobinan en el arrollador, donde un montacargas las retira del mandril y las almacena temporalmente o las transporta hacia la máquina que fabricará el producto. Es importante destacar que en esta etapa del proceso no se generan aguas residuales, ya que se trata de un procedimiento en seco que se mantiene desde el inicio hasta el final del corte de las bobinas.



Figura 5. Desenrollador, cortadora y arrolladora

Fuente: Elaboración propia, 2024.

4.1.2. Línea de Producción de Tubos

- **Desenrollado y unión de flejes**

Se toma el fleje y mediante la ayuda del montacargas se coloca en el desenrollador de entrada de la máquina que procesará el material. El giro del desenrollador se da hacia la derecha de forma que va desenrollando el fleje en dirección hacia la alimentación de la línea de producción.



Figura 6. Desenrollador

Fuente: Elaboración propia, 2024.

Cuando el fleje que se instaló anteriormente fue totalmente desenrollado, se toma un extremo del usado y otro del nuevo fleje que está ingresando al proceso. Mediante una soldadora automática, se realiza la unión de ambos extremos para garantizar la continuidad del proceso productivo. Esta operación se repite cada vez que se introduce un nuevo fleje en el desenrollador.



Figura 7. Unión de flejes

Fuente: Elaboración propia, 2024.

Mientras se está realizando esta operación de unión de flejes el material desenrollado es almacenado temporalmente en un acumulador horizontal. Este acumulador permite que el flujo del material continúe sin interrupciones mientras se lleva a cabo la unión de los flejes. De esta manera, se asegura que el proceso productivo no se detenga y se mantenga una operación continua y eficiente. En este subproceso, no se produce la incorporación de aguas residuales.



Figura 8. Acumulador Horizontal
Fuente: Elaboración propia, 2024.

- **Etapas de formación inicial**

El fleje se introduce en la sección de formación inicial, donde los primeros rodillos empiezan a darle forma redondeada al material. Durante este proceso, el material empieza a ser bañado para su lubricación con Agua-Taladrina, que es una mezcla con propiedades refrigerantes que recircula por toda la línea de producción y ayuda a prevenir el desgaste de los rodillos, evitando también el marcaje de la tubería.

Posteriormente, se lleva a cabo un proceso de inspección para verificar que el fleje esté alcanzando el diámetro adecuado antes de proceder a la soldadura.

En este subproceso, se genera la primera incorporación de aguas residuales al proceso debido al uso de Taladrina mezclada con agua.



Figura 9. Formación inicial
Fuente: Elaboración propia, 2024.

- **Unión del tubo**

Durante el proceso de formación, una vez que el tubo comienza a adquirir la forma redondeada deseada, pasa por una máquina de soldadura automática de alta frecuencia. En esta etapa, las tuberías atraviesan una bobina de inducción a alta velocidad, calentando sus bordes, los cuales luego son presionados por rodillos para formar una costura de soldadura longitudinal, cerrando así el tubo y evitando cualquier apertura.

Estos rodillos, encargados de presionar el tubo, son enfriados continuamente con Agua-Taladrina mediante un chorro directo, lo que permite mantener una baja temperatura y evitar daños. Al mismo tiempo, mediante una cuchilla instalada cerca

de la soldadora se elimina el exceso de la soldadura garantizando un acabado limpio. A lo largo de este subproceso, se puede observar la generación de aguas residuales, las cuales recirculan a través de toda la línea de producción y se expulsan mediante un chorro directo sobre el material en proceso de producción.



Figura 10. Unión del tubo

Fuente: Elaboración propia, 2024.

Después de la soldadura, se realiza una inspección para verificar su calidad. En esta inspección, se comprueba que la soldadura esté correctamente realizada, sin montajes defectuosos ni fallos en el estado de la unión.

- **Enfriamiento del tubo**

A continuación, el tubo pasa por una pileta de enfriamiento que contiene Agua-Taladrina. Este baño sirve para enfriar el acero soldado, ayudando a estabilizar el material y a mantener las propiedades mecánicas adecuadas del tubo.

En este subproceso, también se puede observar la generación de aguas residuales a partir de la pileta de enfriamiento mencionada anteriormente.



Figura 11. Pileta de enfriamiento
Fuente: Elaboración propia, 2024.

- **Calibración y formación final del tubo**

Después del enfriamiento del tubo, se procede a la calibración final, durante la cual se ajustan el grosor y las dimensiones finales del producto para cumplir con las especificaciones requeridas.

En esta etapa, se realiza una inspección para asegurar que el tubo tenga las medidas correctas y cumpla con los requisitos necesarios para pasar al siguiente proceso de moldeado. Esta inspección garantiza que el producto final esté dentro de las tolerancias especificadas y esté listo para la siguiente fase de producción.



Figura 12. Calibración de tubos

Fuente: Elaboración propia, 2024.

Posteriormente los tubos ingresan a la etapa de formación final, donde los cabezales turcos les proporcionan el moldeo definitivo. En esta fase, se lleva a cabo una inspección para verificar que los tubos cumplan con todas las medidas requeridas en diámetro y altura, asegurando que el producto final cumpla con las especificaciones exactas.



Figura 13. Formación final

Fuente: Elaboración propia, 2024.

En este subproceso de calibración y formación, el tubo continúa siendo bañado con las aguas residuales que contienen el Agua-Taladrina utilizada en todos los subprocesos anteriores.

- **Lubricación del tubo**

Posterior a la salida de los cabezales turcos, los tubos se someten a un proceso de lubricación por goteo. En este proceso, los tubos son lubricados con Diesel, un procedimiento que proporciona una capa protectora contra la corrosión. Este tratamiento es esencial para preservar la integridad de los tubos durante su almacenamiento y transporte, asegurando que se mantengan en óptimas condiciones hasta su utilización final.

El Diesel en exceso que se derrama en este subproceso se mezcla con las aguas residuales generadas a lo largo de todo el proceso de fabricación de tubería. Por lo tanto, este es el último subproceso en el que se produce agua residual de forma directa.



Figura 14. Lubricación de tubos
Fuente: Elaboración propia, 2024.

- **Corte del tubo**

Finalmente, los tubos son sometidos a un proceso de corte utilizando una sierra especializada. En esta etapa, los tubos se cortan de acuerdo con las especificaciones programadas, en este caso, en segmentos de 6 metros de longitud.

Este proceso de corte se realiza con precisión para garantizar que cada pieza individual tenga las dimensiones exactas requeridas.

A partir de este subproceso, ya no se genera agua residual; el agua presente en el proceso es únicamente la que se transporta en el interior del tubo.



Figura 15. Corte Final

Fuente: Elaboración propia, 2024.

- **Empaquetado del producto final**

Esta etapa marca la fase final del proceso de fabricación de tubos. Una vez cortados, los tubos son movilizados por rodillos a lo largo de la línea de producción hacia a la mesa de evacuación, donde se lleva a cabo una inspección para asegurarse de que no presenten defectos ni imperfecciones.



Figura 16. Mesa de evacuación

Fuente: Elaboración propia, 2024.

Posteriormente, los tubos son apilados y organizados en paquetes de 20 o 25 unidades, además, los extremos de cada tubo son pintados con un color distintivo para facilitar la identificación y diferenciación de cada producto.

Antes de ser trasladados al área de almacenamiento, los paquetes se mantienen inclinados en la mesa durante unos minutos. Este procedimiento permite que el exceso de Agua-Taladrina y Diesel, utilizados en los procesos previos, se drene adecuadamente. De esta manera, se evita la acumulación de líquidos en el suelo, reduciendo el riesgo de derrames.

Finalmente, un montacargas se encarga de recoger cada paquete de tubos y trasladarlo al sitio de almacenamiento designado.

Al igual que en el subproceso anterior, el agua presente en este proceso es únicamente la que se transporta en el interior del tubo.



Figura 17. Armado de paquetes
Fuente: Elaboración propia, 2024.

4.2. Diagrama de flujo del proceso de fabricación de tubos

El proceso de producción de tubos metálicos involucra varios centros de trabajo, los cuales se detallan a continuación.

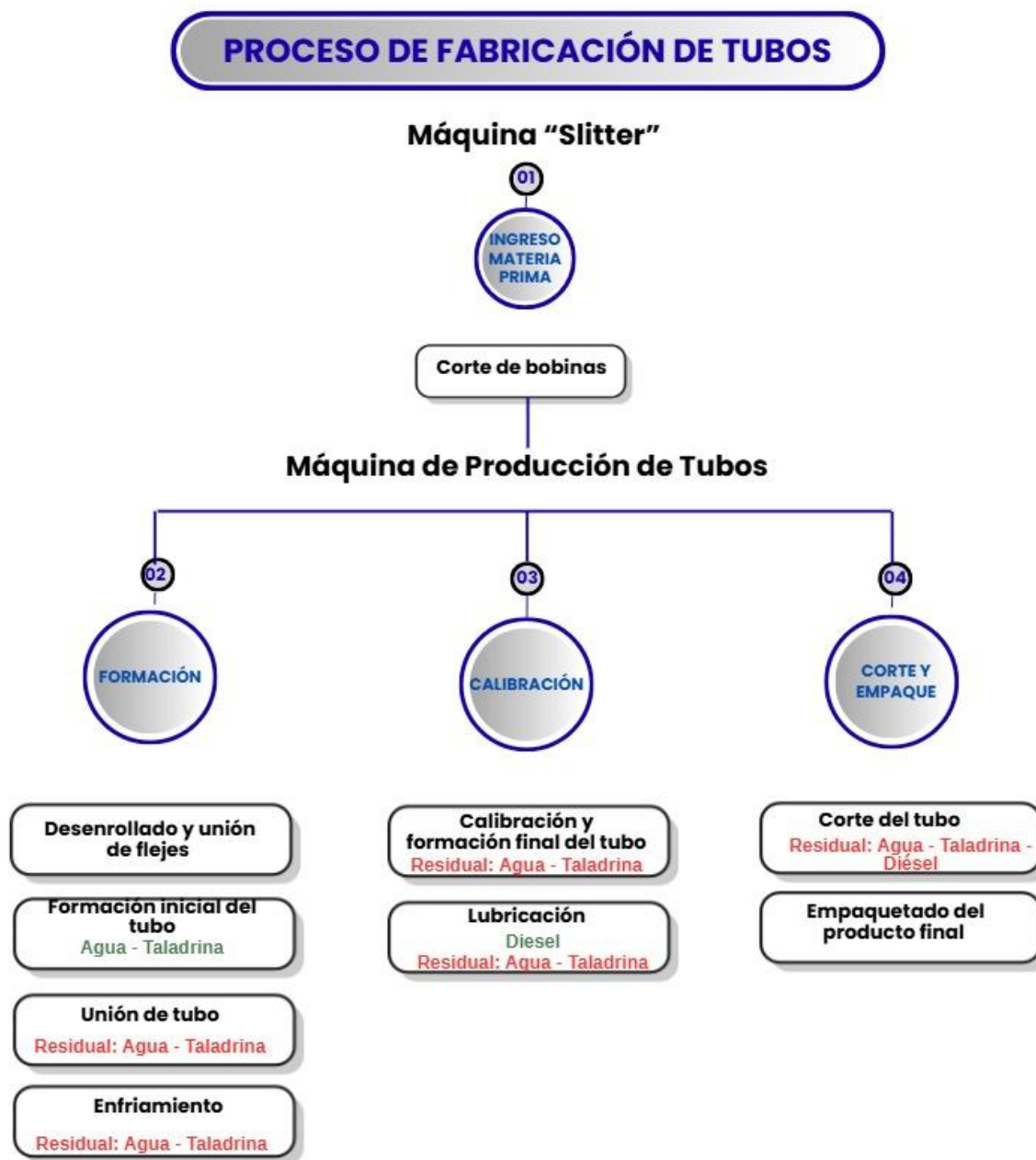


Figura 18. Diagrama de flujo del proceso

Fuente: Elaboración propia, 2024.

4.3. Generación de aguas residuales en el proceso productivo

La fabricación de tuberías metálicas en la empresa Metales Flix es un proceso altamente estructurado que involucra diversas etapas de producción, desde el corte inicial de las bobinas de metal hasta el empaquetado del producto final.

Inicialmente, como se indicó en la sección anterior, el proceso comienza con la línea de corte de bobinas (*Slitter*), donde las bobinas de metal son divididas en tiras más angostas para su posterior procesamiento. Posteriormente, estas tiras ingresan a la línea de producción de tubos, donde se desarrollan distintas etapas como el desenrollado, la soldadura, el enfriamiento, la calibración y la lubricación, hasta llegar al corte final y empaquetado del producto.

A lo largo de este proceso, se destaca el uso de Agua-Taladrina y Diesel, sustancias empleadas para la lubricación y protección de los tubos. Estas sustancias generan aguas residuales, cuya correcta gestión es fundamental para mitigar la contaminación del agua. Mientras que algunas fases del proceso, como el corte y el desenrollado, no generan residuos líquidos, otras, como la soldadura y el enfriamiento, contribuyen directamente a la producción de aguas residuales que deben ser adecuadamente tratadas.

Finalmente, el proceso concluye con la inspección y organización de los tubos en paquetes listos para su distribución.

Para determinar la composición y generación de las aguas residuales, se realizaron diversas visitas a las instalaciones de la empresa Metales Flix, con el objetivo de analizar en detalle cada una de estas etapas del proceso de producción.

A través de estas visitas, se pudo identificar que la generación de aguas residuales proviene de una línea de producción compuesta por cuatro máquinas

encargadas de fabricar tubería metálica. Estas máquinas están interconectadas mediante canales que permiten la recirculación del agua a través de todas ellas. Al finalizar el proceso, el agua fluye hacia un tanque de captación, desde donde se eleva a una torre de enfriamiento antes de regresar nuevamente al ciclo de producción.

Dado que estas máquinas son utilizadas de manera continua en el proceso de fabricación, es crucial que se mantengan en perfectas condiciones operativas que impidan la acumulación de residuos. La presencia de estos residuos puede ensuciar el agua, lo que provoca un incremento en la acumulación de sólidos, dificultando el proceso de recirculación y afectando la calidad del agua utilizada.

4.4. Composición química de los productos que contaminan el agua.

Las aguas residuales generadas durante el proceso de fabricación de tuberías metálicas contienen diversos productos utilizados de manera indispensable en las diferentes etapas de producción. Para mejorar la caracterización de estas aguas y facilitar su adecuado tratamiento, se debe detallar la composición específica de cada uno de los productos involucrados en el proceso.

Esta información no solo facilitará una comprensión más profunda de los contaminantes presentes, sino que también permitirá la implementación de medidas más eficaces para su manejo y control. Todos los parámetros a continuación se consideran para el desarrollo del caso.

Tabla 8*Componentes de los productos de las aguas residuales*

Nombre común	Parámetro donde se clasifica	Descripción	Componentes
Aceite para trabajo en metales (Taladrina)	DBO, DQO, Hidrocarburos, GyA	Es aplicado desde la etapa de formación inicial hasta la etapa de enfriamiento, tiene como objetivo la lubricación y protección de la rodillera	<ol style="list-style-type: none"> 1. Aceite mineral altamente refinado (C15 - C50) 2. Sodio, sulfonato 3. Dietilénico, glicol 4. Glicotéres 5. 2,6-di-tert-butilfenol
Diesel Automotriz	DBO, DQO, Hidrocarburos, GyA	Se aplica en la etapa de lubricación y es utilizado como protección del producto terminado contra la corrosión durante su almacenamiento	<ol style="list-style-type: none"> 1. Diesel no.2
Hierro Negro	Metales pesados SST SSed	Fabricación de tubería	<ol style="list-style-type: none"> 1. Carbono 2. Sílice 3. Manganeso 4. Fósforo 5. Azufre
Hierro Pulido	Metales pesados SST SSed	Materia prima para producir tubería galvanizada	<ol style="list-style-type: none"> 1. Carbono 2. Sílice 3. Manganeso 4. Fósforo 5. Azufre 6. Aluminio
Cromo	Metales pesados SST SSed	Materia prima para el proceso de Galvanizado	<ol style="list-style-type: none"> 1. Trióxido de cromo 2. Dióxido del silicio ácido nítrico 3. Ácido fosfórico, sal de cromo (3+) 4. Tris(cromato) de dicromo

Fuente: Elaboración propia, 2024.

Las aguas residuales generadas en el proceso productivo presentan altas concentraciones de grasas, aceites, hidrocarburos y compuestos orgánicos que incrementa significativamente la DBO y DQO. Esto puede afectar la calidad del agua en cuerpos receptores, dificultando su depuración natural y requiriendo un tratamiento especializado para la remoción o reducción de estos contaminantes.

Además, la presencia de metales pesados, SSed y en suspensión, derivados del uso de hierro negro, hierro pulido y compuestos de cromo en la fabricación de tuberías, supone un riesgo ambiental considerable.

4.5. Caracterización de las aguas residuales generadas

A continuación, se describe en detalle el comportamiento de la generación del agua residual proveniente del proceso de producción de tubería metálica, así como los parámetros universales de calidad, a través de la caracterización tanto del comportamiento hidráulico como de los aspectos cualitativos de esta agua.

Estas caracterizaciones permiten identificar la necesidad de tratamiento para este proyecto, de acuerdo con las disposiciones establecidas por la legislación nacional. En este contexto, la caracterización del agua resulta fundamental en el proceso de tratamiento de aguas residuales, ya que sus características son clave para comprobar el método de tratamiento primario propuesto.

4.5.1 Caracterización hidráulica

El tanque que almacena las aguas residuales y las recircula a través de las cuatro máquinas que componen esta línea de producción de tubería metálica, tiene una capacidad de 16 m³. A este tanque se le añaden diariamente los productos que se detallan en el siguiente cuadro, ya que la temperatura del proceso genera una pérdida diaria de 1 m³ debido a la evaporación, además de una pequeña cantidad que queda almacenada en el tubo.

Tabla 9

Adición de productos al proceso de fabricación de tubos por recirculación de agua

Producto	Cantidad inicial	Cantidades diarias por pérdida	Cantidad anual por limpieza
Taladrina	1.28 m ³	0.0378 m ³	0.64 m ³
Agua	14.72 m ³	1 m ³	7.36 m ³
Diesel	0.0757 m ³	0.0757 m ³	0.0757 m ³

Fuente: Elaboración propia, 2024.

Para determinar el momento adecuado para agregar la cantidad necesaria de agua, se realiza una verificación visual diaria. En esta inspección, se comprueba si el nivel de agua alcanza la primera grada de la escalera. Si el nivel está por debajo de esa grada, se agrega la cantidad indicada previamente. En caso contrario, se continúa monitoreando durante el día hasta determinar el momento de adición.



Figura 29. Medición llenada del Tanque

Fuente: Elaboración propia, 2024.

Para determinar la necesidad de agregar Taladrina, se realizan dos mediciones de viscosidad con un refractómetro, verificando que los valores de % Brix se mantengan entre 3.5 y 4.0. Se procura no exceder el 4% para evitar un consumo innecesario de Taladrina.

Si la medición muestra un valor inferior al 3.5% Brix, se agregarán 10 galones de Taladrina. Posteriormente, se realiza una nueva medición para confirmar que el porcentaje se encuentra dentro de los parámetros mencionados.



Figura 3. Medición viscosidad de Taladrina
Fuente: Elaboración propia, 2024.

Con la finalidad de mantener la integridad del producto adicionado, cada año se lleva a cabo una limpieza integral del tanque de almacenamiento, durante la cual se desecha la mitad de su contenido y se rellena con material nuevo, siguiendo las especificaciones detalladas en la Tabla 8.

4.5.2 Caracterización de carga contaminante

Se realiza muestreo de agua residual tomada de la pileta de enfriamiento de la línea de producción de tubería metálica de la empresa Metales Flix, la cual contiene los contaminantes indicados en la Tabla 7, por lo que se envía a analizar la muestra considerando los parámetros universales que, según lo establecido en el Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales N° 33601 son: DBO, DQO, SST, GyA, SSed y además como parámetros complementarios: Aluminio, Cromo, Zinc e Hidrocarburos

La muestra tomada tiene visiblemente un aspecto turbio, de color blanco sucio, presenta un olor a aceite lubricante y la temperatura del agua en el momento del muestreo es de 27.2 °C.

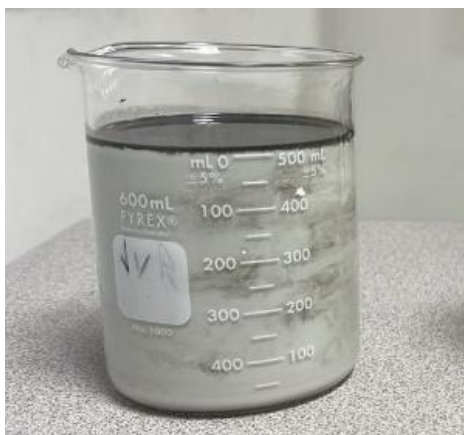


Figura 21. Muestra de agua cruda
Fuente: Elaboración propia, 2024.

Se obtiene el Resultado N°: 240924-C el día 24 de septiembre del 2024 (Anexo 10. Análisis de Laboratorio agua cruda), con los datos indicados en la siguiente tabla:

Tabla 10

Comparativa de resultado de primer análisis de laboratorio de agua cruda con límites permisibles según Reglamento

Parámetro	Resultados según análisis	Límites según reglamento
Temperatura en el momento del muestreo	27.2 ±0.1 °C	15 °C ≤ T ≤ 40°C
pH	9.1 ±0.1	5 a 9
DBO _{5,20}	53,000 ± 2,650 mg/l	50 mg/l
DQO	104,000 ± 5,200 mg/l	150 mg/l
SSed	<0.1 ml/l	1 ml/l

Parámetro	Resultados según análisis	Límites según reglamento
SST	22,340 ± 1,120 mg/l	50 mg/l
GyA	4,170 ± 100 mg/l	30 mg/l
SAAM	6.9 ± 0.4 mg/l	5 mg/l
Hidrocarburos totales	1,985 ± 100 mg/l	10 mg/l
Aluminio	10.4 ± 0.2 mg/l	5 mg/l
Cromo	0.095 ± 0.001 mg/l	1.5 mg/l
Zinc	20 ± 1 mg/l	5 mg/l

Fuente: Elaboración propia, 2024.

Según comparativa de la tabla anterior la temperatura, los SSed y el Cromo, se encuentran dentro del rango permitido, el pH se encuentra ligeramente por encima del valor máximo, por lo que no representan un problema de fondo su cumplimiento normativo.

La DBO es extremadamente alta, lo que indica una gran cantidad de materia orgánica biodegradable en el agua residual. La DQO también es muy elevada, lo que sugiere una alta concentración de contaminantes orgánicos tanto biodegradables como no biodegradables. La cantidad de SST es extremadamente alta, causante de la turbidez y coloración que se aprecia en la muestra (Ver Figura 21).

El alto contenido de grasas y aceites en el agua puede generar problemas en el tratamiento de aguas residuales y obstrucciones en sistemas de drenaje. Es necesario implementar medidas para reducir este parámetro. La presencia de hidrocarburos es significativamente superior al límite permitido.

Dado que la concentración de SAAM es de 6.9 mg/l, apenas 1.9 mg/l por encima del límite reglamentario de 5 mg/l, y considerando que la reducción de la DBO y la DQO conlleva una disminución de este parámetro, no se considera necesario realizar análisis adicionales ni tratamientos específicos para SAAM.

El enfoque principal debe estar en la reducción de la DBO, DQO, SST, GyA e hidrocarburos, así como la concentración de aluminio y zinc que contienen valores que superan ampliamente los límites normativos. Al implementar tratamientos para estos parámetros, se espera lograr una disminución indirecta de las SAAM e incluso metales como aluminio y zinc que están por encima del límite permitido en cantidades considerables, más no excesivas, asegurando así el cumplimiento de la normativa sin necesidad de medidas adicionales.

Capítulo 5. Diseño e implementación del proyecto

Diversos estudios mencionados en la Tabla 4 han evaluado el uso de coagulantes como $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, FeCl_3 , FeSO_4 , PAC, Cal y otros para tratar aguas residuales. Los métodos comunes incluyen la prueba de jarras, donde se ajustan dosis y condiciones de agitación para optimizar la eliminación de contaminantes.

Tal como mencionan Cabrera et al., (2009), la coagulación-floculación es un proceso en el que se incorpora aditivos químicos a las aguas residuales para facilitar la sedimentación de partículas coloidales, además, este método contribuye a acelerar el proceso de sedimentación mediante la formación de flóculos.

Dentro de los parámetros más usualmente evaluados están Turbidez, DQO, SST, GyA. Los coagulantes más utilizados según las investigaciones son $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ y FeCl_3 , los cuales destacan por su alta efectividad en remover turbidez (sólidos en suspensión), DQO y grasas, con eficiencias de hasta 100% en turbidez y grasas.

Basado en lo investigado y considerando los excelentes resultados obtenidos en diversos estudios previos sobre la aplicación del método de Coagulación-Floculación, se opta por evaluar este enfoque para el tratamiento de las aguas residuales en nuestro caso de estudio. En las investigaciones revisadas, se observó que este método ha mostrado una gran efectividad en industrias que generan efluentes con características similares, especialmente aquellos con altos niveles de GyA, DQO y SST. Cabe destacar que la tecnología de Coagulación-Floculación ha sido probada, consolidada y reconocida como económicamente viable en los distintos estudios analizados, lo que respalda su selección como una alternativa eficiente y sostenible para nuestro proyecto.

El análisis previo reveló una elevada concentración de materia orgánica e inorgánica, con valores extremadamente altos de DBO y DQO, lo que indica una fuerte carga contaminante. La turbidez del agua, posiblemente causada por la alta cantidad de SST, así como la presencia excesiva de grasas, aceites e hidrocarburos, pueden dificultar su tratamiento. Además, los niveles de aluminio y zinc superan los límites normativos.

Si bien el pH está ligeramente elevado y algunos parámetros, como cromo y SSed, cumplen con la normativa, el tratamiento debe enfocarse en la reducción de DBO, DQO y SST, lo que contribuirá a mejorar la calidad del agua y reducir contaminantes complementarios que no exceden por tanto los límites, como las SAAM, pH, aluminio y zinc.

Ante esta problemática, la coagulación-floculación se presenta como una alternativa efectiva para la remoción de sólidos en suspensión, grasas y aceites, facilitando la sedimentación y mejorando la eficiencia del tratamiento de las aguas residuales.

Para evaluar la aplicación del método se utilizarán las mismas condiciones con los siguientes coagulantes: Z4500, WY220B compuesto de Aluminio y el WY220C compuesto de Hierro (ver Fichas Técnicas en Anexo 13. Ficha Técnica Coagulante Z4500, Anexo 14. Ficha Técnica Coagulante WY220B, Anexo 15. Ficha Técnica Coagulante WY220C), en conjunto con el floculante TS08 FA para todas las rondas. A continuación, se detallan las corridas experimentales para la aplicación del método:

Tabla 11

Corridas experimentales para aplicación de método Coagulación-Floculación.

Beacker	1	2	3	4	5
Tiempo de agitación (min)	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
RPM Coagulación	150	150	150	150	150
Tiempo de agitación lenta (min)	5	5	5	5	5
RPM Floculación	30	30	30	30	30
Tiempo de sedimentación (min)	20	20	20	20	20

Fuente: Elaboración propia, 2024

Para aplicar el tratamiento a estas aguas residuales, se recoge previamente una muestra de 60 litros de agua residual con la finalidad de probar la efectividad del método de Coagulación-Floculación.

Para la realización de las pruebas, se efectúan los siguientes pasos:

Se prepara una disolución con 200 ml de agua pura y 2,0125 g de Floculante TS08 FA al 1% (ver Anexo 12. Ficha Técnica Floculante TSO8 FA). Se utiliza un agitador marca Thermo Scientific, Código SC-06734. Se agita utilizando una pastilla de agitación magnética por un periodo de 45 min.

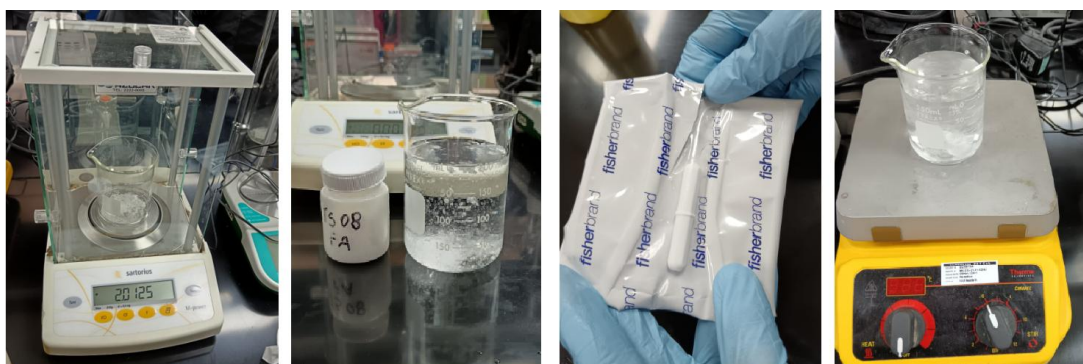


Figura 4. Preparación de Floculante

Fuente: Elaboración propia, 2024.

Se seleccionan 5 Beakers con una capacidad de 1,000 ml cada uno, los cuales se llenan a su máxima capacidad con el agua cruda.

Posteriormente, son colocados en el Equipo de prueba de jarras, Marca Phipps&Bird código SC-06645, y se define realizar tres rondas, en las cuales se utiliza un tipo diferente de Coagulante. Para cada ronda, se elige uno de los coagulantes propuestos en conjunto con el mismo floculante TS08 FA para todas las rondas.

Luego, se hace una variación en la dosis del coagulante agregado según Beakers (Ver Tabla 10). Se inicia agitación rápida por un período de 1.5 min a una velocidad de 150 rpm.

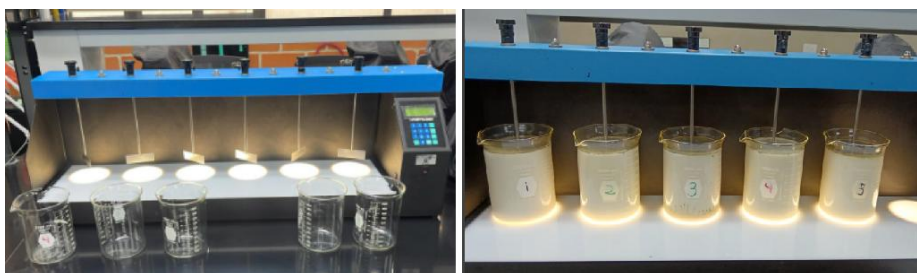


Figura 5. Prueba de jarras

Fuente: Elaboración propia, 2024.

A continuación, se añaden 1.5 ml del floculante preparado en el paso 1 a cada uno de los Beakers. Luego, se realiza una agitación lenta durante 5 min a una velocidad de 30 rpm, y posteriormente se deja reposar la mezcla durante 20 min. Finalmente, se selecciona la mejor muestra de cada ronda con base en un análisis visual.

Las siguientes tablas muestran las dosis aplicadas en cada una de las rondas experimentales con los distintos coagulantes evaluados. Cada dosis fue dosificada en 1 ml de agua cruda para analizar su desempeño en el proceso de tratamiento.

- **Ronda 1 Coagulante Z4500**

Tabla 12

Dosis utilizada el Coagulante Z4500 en 1 ml de agua cruda

Beacker	1	2	3	4	5
Dosis de Coagulante (mg/l)	622.50	1,245.00	1,556.25	1,867.50	2,490.00
Tiempo de agitación (min)	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
RPM Coagulación	150	150	150	150	150
Dosis de Floculante (mg/l)	15.75	15.75	15.75	15.75	15.75
Tiempo de agitación lenta (min)	5	5	5	5	5
RPM Floculación	30	30	30	30	30
Tiempo de sedimentación (min)	20	20	20	20	20

Fuente: Elaboración propia, 2024.



Mejor muestra

2.5ml coagulante
1.5ml floculante

Figura 24. Ronda 1 Coagulante Z4500

Fuente: Elaboración propia, 2024.

- **Ronda 2 Coagulante WY220B Al**

Tabla 13

Dosis utilizada el Coagulante WY220B Al en 1 ml de agua cruda

Beacker	1	2	3	4	5
Dosis de Coagulante (mg/l)	670.00	1,340.00	1,675.00	2,010.00	2,680.00
Tiempo de agitación (min)	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
RPM Coagulación	150	150	150	150	150
Dosis de Floculante (mg/l)	15.75	15.75	15.75	15.75	15.75
Tiempo de agitación lenta (min)	5	5	5	5	5
RPM Floculación	30	30	30	30	30
Tiempo de sedimentación (min)	20	20	20	20	20

Fuente: Elaboración propia, 2024.



Mejor muestra
2ml coagulante
1.5ml floculante

Figura 25. Ronda 2 Coagulante WY220B Al

Fuente: Elaboración propia, 2024.

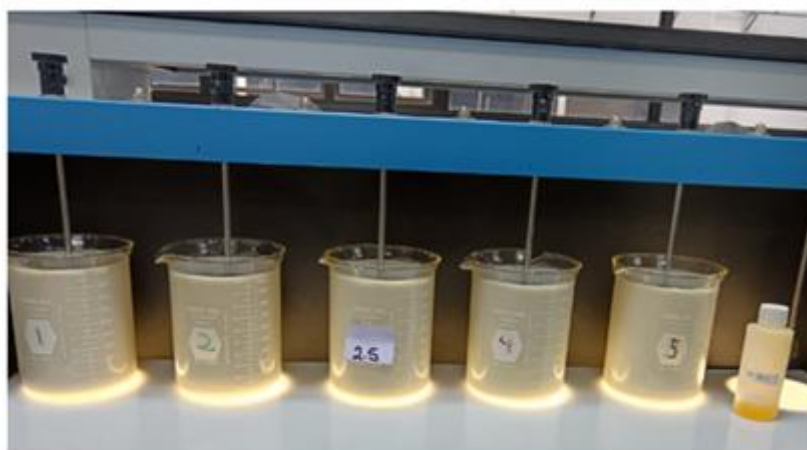
- **Ronda 3 Coagulante WY220C Fe**

Tabla 14

Dosis utilizada el Coagulante WY220C Fe en 1 ml de agua cruda

Beacker	1	2	3	4	5
Dosis de Coagulante (mg/l)	670.00	1,340.00	1,675.00	2,010.00	2,680.00
Tiempo de agitación (min)	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
RPM Coagulación	150	150	150	150	150
Dosis de Floculante (mg/l)	15.75	15.75	15.75	15.75	15.75
Tiempo de agitación lenta (min)	5	5	5	5	5
RPM Floculación	30	30	30	30	30
Tiempo de sedimentación (min)	20	20	20	20	20

Fuente: Elaboración propia, 2024.



Mejor muestra
2ml coagulante
1.5ml floculante

Figura 66. Ronda 3 Coagulante WY220C Fe

Fuente: Elaboración propia, 2024.

Finalmente, se tomó el líquido clarificado de la mejor muestra de cada ronda para enviarlo al laboratorio a analizar, con la indicación de analizarles a las 3 muestras el DQO y para aquella muestra que obtenga el mejor resultado (nivel de menor de DQO) se le aplique análisis de SST, GyA, aluminio y zinc.



Figura 77. Muestra para pruebas de laboratorio

Fuente: Elaboración propia, 2024.

Capítulo 6. Análisis de resultados

Para evaluar la eficacia del tratamiento aplicado, las muestras recolectadas previamente fueron enviadas al laboratorio designado para su análisis, tras la implementación del proceso de Coagulación-Floculación. Los resultados obtenidos de estas pruebas fueron comparados con los parámetros medidos en el agua cruda, permitiendo así determinar la eficiencia del tratamiento en términos de remoción de contaminantes.

Se obtiene el Resultado N°: 111124-F el día 11 de noviembre del 2024 (Anexo 11. Análisis de Laboratorio agua pretratada), con los datos indicados en la siguiente tabla:

Tabla 15

Comparativa de porcentajes de remoción según Coagulante utilizado.

Parámetro	Límite permisible (mg/l)	Agua cruda (mg/l)	Z4500 mg/l	WY 220B Al mg/l	WY 220C Fe mg/l
DQO	150	104,000 ± 5,200	2,060 ± 41	2,630 ± 56	2,580 ± 52

Nota: No se evaluó el DBO ya que al formar parte del DQO, es de esperar que se reduzca proporcionalmente.

Fuente: Elaboración propia, 2024.

El parámetro evaluado en este análisis es la DQO, cuyo límite permisible establecido es de 150 mg/l. La concentración de DQO en el agua cruda analizada fue extremadamente alta, con un valor promedio de 104,000 mg/l, lo que evidencia una carga orgánica severamente elevada en el afluente.

Se evalúa mediante Coagulación - Floculación el resultado de aplicar los coagulantes: Z4500, WY 220B con Aluminio y WY 220C con Hierro. Todas las tecnologías lograron reducciones significativas en la concentración de DQO, con los siguientes resultados:

- Z4500: 2,060 mg/l
- WY 220B Al: 2,630 mg/l
- WY 220C Fe: 2,580 mg/l

A partir de estos datos, se calculó el porcentaje de remoción de DQO respecto al agua cruda:

- Z4500: 98.02%
- WY 220B Al: 97.47%
- WY 220C Fe: 97.52%

Este análisis revela que todas las tecnologías presentan una eficiencia de remoción superior al 97%, lo cual es un desempeño técnico notable dada la elevada carga inicial. El coagulante Z4500 mostró una eficiencia ligeramente superior a la obtenida con WY 220B con aluminio y WY 220C con hierro.

Tras analizar el DQO de las tres muestras, se selecciona la muestra tratada con el coagulante Z4500, ya que presenta el valor más bajo de este parámetro. Esto indica una menor contaminación, debido a una reducción en la cantidad de materia orgánica e inorgánica oxidable en el agua. Por lo tanto, a esta muestra se le aplica análisis de los demás parámetros: SST, GyA, SSed, aluminio, cromo, zinc e hidrocarburos.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos en cuanto a la eficiencia de remoción utilizando el Coagulante Z4500, los cuales se detallan en la siguiente tabla.

Tabla 16*Resultado de eficiencia de remoción con el Coagulante Z4500.*

Parámetro	Límite permisible (mg/l)	Agua cruda (mg/l)	Agua tratada (mg/l)	Agua tratada % Remoción
DQO	150	104,000 ± 5,200	2,060 ± 41	98.02%
SST	50	22,340 ± 1,120	26 ± 3	99.9%
GyA	30	4,170 ± 100	<4	99.9%
SSed	1	<0.1	-	-
Aluminio	5	10.4 ± 0.2	0.4 ± 0.2	96.15%
Cromo	1.5	0.095 ± 0.001	-	-
Zinc	5	20 ± 1	2 ± 1	90.0%
Hidrocarburos	10	1,985 ± 100	<4	99.9%

Fuente: Elaboración propia, 2024.

Basado en los resultados obtenidos se realiza un análisis de cada parámetro:

Demanda Bioquímica de Oxígeno, presenta un valor Inicial: 53,000 mg/l, comparado con el límite permisible según reglamento que es de 50 mg/l, la DBO alta sugiere una fuerte carga orgánica biodegradable. Este valor es característico de aguas residuales industriales sin tratar.

Demanda Química de Oxígeno, indica un valor Inicial: 104,000 mg/l y un valor final una vez aplicado el método con el coagulante Z4500 de 2,060 mg/l, lo que significa un porcentaje de reducción de 98.02%, aun así, sobrepasa el límite permisible que es de 150 mg/l. Aunque el coagulante Z4500 logra una reducción significativa de la carga orgánica refractaria, los valores finales siguen superando el límite permisible por 17 veces.

Los Sólidos Suspendidos Totales, presentan un valor Inicial: 22,340 mg/l y un valor final con Z4500: 26 mg/l, comparado con el límite permisible de 50 mg/l se logra un porcentaje de reducción de 99.9%. El tratamiento con Z4500 logra una remoción de SST, cumpliendo el reglamento.

Grasas y Aceites, cuentan con un valor Inicial de 4,170 mg/l y un valor final con Z4500 de <4 mg/l, siendo que el límite permisible es de 30 mg/l, se obtiene un porcentaje de reducción del 99.9%. El coagulante Z4500 demuestra alta eficacia para eliminar aceites y grasas, cumpliendo con los límites reglamentarios.

Los **Hidrocarburos Totales** se determinan a partir de las grasas y aceites mediante el método químico 5520 debido a que comparten características similares en su composición y comportamiento químico, por lo tanto, su valor final es de <4 mg/l, según el reglamento el valor límite permisible es de 10 mg/l, lo que supone un porcentaje de reducción de 99.9%, por lo que este parámetro también cumple según el reglamento.

Metales Pesados (Aluminio y Zinc), para el caso de Aluminio se tiene un valor inicial de 10.4 mg/l contra un valor final de 0.4 mg/l, logrando un porcentaje de reducción de 96.15%. Con respecto al Zinc se muestra un valor inicial de 20 mg/l y un valor final de 2 mg/l logrando una reducción de 90.0%, para ambos casos el límite permisible es de 5 mg/l, por lo que ambos parámetros quedan cumpliendo, se interpreta que la remoción de aluminio y zinc es efectiva gracias a la formación de precipitados durante la coagulación-floculación.

Seguidamente, se ilustra gráficamente los parámetros obtenidos una vez aplicado el tratamiento primario mediante el método Coagulación-Floculación:

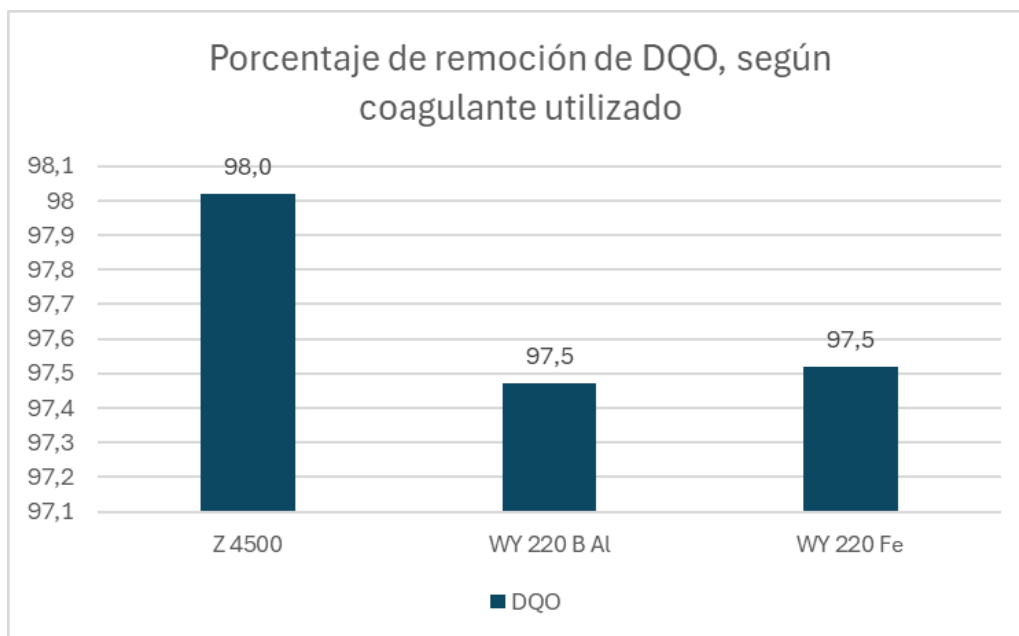


Gráfico 1. Comparativa de porcentaje de remoción de DQO, según el coagulante utilizado

Fuente: Elaboración propia, 2024

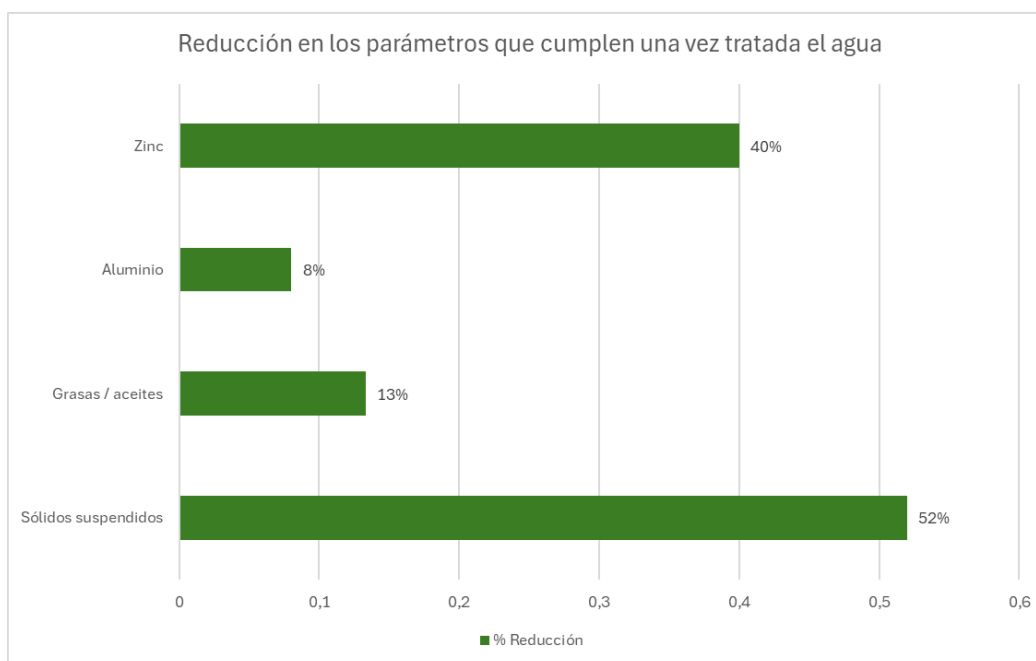


Gráfico 2. Porcentaje de reducción en los parámetros que cumplen posterior a la aplicación del método con el coagulante Z4500 con respecto al reglamento

Fuente: Elaboración propia, 2024

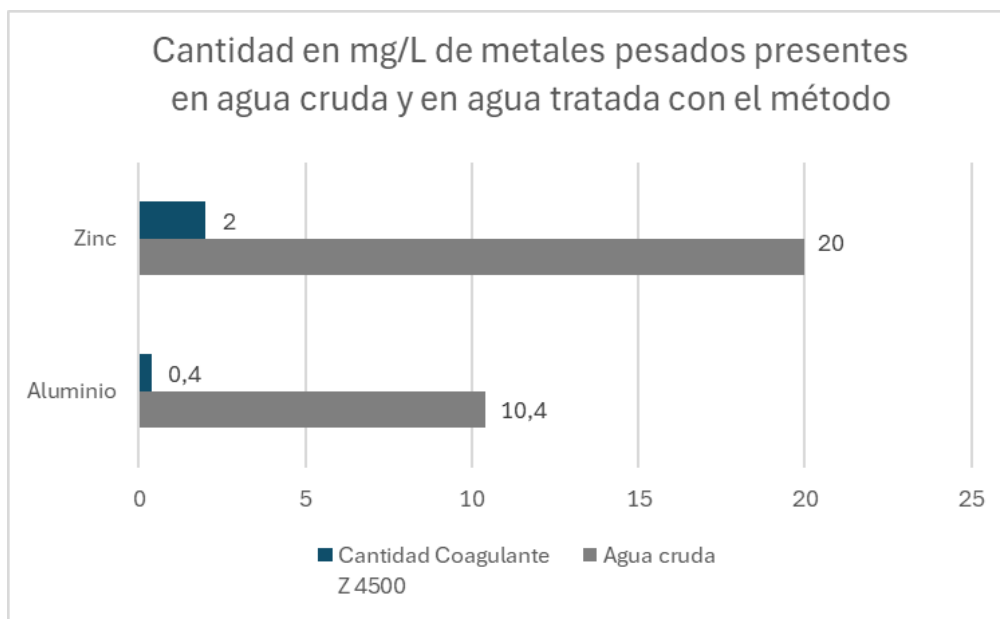


Gráfico 3. Comparativa de metales pesados en mg/l entre el agua cruda y el agua una vez aplicado el método con el coagulante Z4500
Fuente: Elaboración propia, 2024.

Como era previsible debido a los elevados valores de DBO y DQO, el tratamiento aplicado no logró reducir estos parámetros hasta niveles normativos. No obstante, el método de coagulación-floculación demostró ser altamente efectivo en términos generales, destacándose especialmente el coagulante Z4500 por su alta eficiencia en la mejora de los siguientes parámetros:

- SST: Reducción del 99.9%.
- GyA e Hidrocarburos totales: Reducción del 99.9%.
- Metales pesados (aluminio y zinc): Reducciones superiores al 90%.

A continuación, se presentan los resultados correspondientes al cumplimiento de los parámetros evaluados según la normativa vigente, los cuales se detallan en la siguiente tabla.

Tabla 17*Cumplimiento global reglamentario de los parámetros evaluados*

Parámetro	Cumple Normativa	Observación
DQO	No	Reducción significativa, pero requiere tratamiento complementario.
DBO	No	No se evaluó después del tratamiento, pero al formar parte del DQO, es de esperar que se haya reducido proporcionalmente.
SST	Sí	Gran reducción. Cumple normativa.
GyA	Sí	Cumple ampliamente.
Hidrocarburos	Sí	Remoción efectiva.
Aluminio	Sí	Cumple normativa.
Zinc	Sí	Cumple normativa.

Fuente: Elaboración propia, 2024.

A partir de la validación práctica y conforme a los resultados obtenidos en la Tabla 4, se corrobora que la optimización de parámetros operacionales particularmente el ajuste en la dosificación de coagulantes y floculantes, así como la selección adecuada de las sustancias utilizadas, incide de manera significativa en la mejora del desempeño del tratamiento. Específicamente, se observa un incremento en la eficiencia de remoción de parámetros clave como la DQO, la turbidez, el color aparente, GyA, y SST.

Estos resultados evidencian la importancia de una caracterización previa del agua residual y de ensayos preliminares que permitan determinar las condiciones óptimas de operación, a fin de maximizar la eficacia del proceso de coagulación-floculación y, con ello, contribuir a un tratamiento más eficiente y sostenible.

6.1. Análisis de costos

Se realiza un análisis de costos operativos (no se consideran costos de inversión) con el objetivo de evaluar el costo aproximado de implementar el método de Coagulación-Floculación en el tratamiento de este tipo de aguas residuales. Este análisis se hace para estimar los costos de los químicos necesarios para tratar un metro cúbico (1 m³) de agua contaminada (Anexo 17. Cotización Coagulante y Floculante), recordando que el tratamiento del agua residual se realiza una vez al año gestionando la mitad del tanque que corresponde a 8 m³. Los resultados fueron comparados con los costos asociados al tratamiento actualmente gestionado por un proveedor externo, al cual la empresa Metales Flix recurre para tratar estas aguas.

Seguidamente se presenta el análisis de los costos químicos asociados a la aplicación del método de Coagulación-Floculación en agua cruda, detallado en la siguiente tabla.

Tabla 18

Análisis de costos químicos por aplicación método de Coagulación-Floculación en agua cruda

Productos utilizados	Costo en \$ producto x kg	Densidad (g/ml)	Costo en \$ por ml	Cantidad producto químico usado en 500 ml	Costo en \$ para tratar 500 ml	Cantidad producto (ml) para tratar 1m ³	Costo en \$ para tratar 1m ³
Floculante TS08 FA al 1%	5.50	0.72	0.00396	1.5	0.00594	3,000	11.88000
Coagulante Z4500	1.70	1.245	0.00212	4	0.00847	8,000	16.93200
						Total:	28.81

Fuente: Elaboración propia, 2025.

A continuación, se presenta mediante la siguiente tabla comparativa de los costos entre tratar el agua cruda y tratar el agua con la aplicación del método planteando para el tratamiento inicial de la misma:

Tabla 19*Comparativa de costos agua cruda versus agua pretratada*

Opción 1	Opción 2
Costo Total Tratamiento con Gestor autorizado del agua cruda sin pretratamiento por m ³	Costo Total del Tratamiento del agua pretratada por m ³
\$ 350	\$ 288.81

Fuente: Elaboración propia, 2025.

En cuanto al análisis económico, el costo operativo del tratamiento propuesto se estima en \$288.81 por metro cúbico el cual incluye los costos químicos por aplicación del método Coagulación – Floculación y la gestión externa del residuo, en comparación con el costo actual de \$350/m³ sin tratamiento primario, lo que representa un ahorro del 17.48% respecto a la opción actual. Estos resultados confirman que la implementación del método no solo es técnica y operativamente viable, sino también económicamente favorable, contribuyendo de manera significativa a la optimización de los costos de tratamiento de aguas residuales.

Capítulo 7. Conclusiones y recomendaciones

7.1. Conclusiones

El agua residual que se genera en la empresa Metales Flix S.A presenta valores altos que sobrepasan los límites reglamentarios, según la caracterización en el primer análisis la DQO alcanzó 104,000 mg/l y la DBO_{5,20} 53,000 mg/l, un valor extremadamente alto que requiere tratamientos biológicos secundarios especializados. Otros parámetros elevados de acuerdo con el primer análisis es SST con un valor de 22,340 mg/l, GyA 4,170 mg/l, Hidrocarburos con un valor de 1,985 mg/l, Aluminio con 10.4 mg/l y el Zinc con 20 mg/l.

El coagulante Z4500 demuestra ser altamente eficiente en la remoción de varios contaminantes críticos, especialmente:

- SST: Reducción del 99.9%, cumpliendo los límites normativos.
- GyA: Reducción superior al 99.9%, situándose muy por debajo del límite de 30 mg/l.
- Metales pesados (Aluminio y Zinc): Reducción del 96.15% y 90%, respectivamente.
- Hidrocarburos totales: Reducción del 99.9%, logrando cumplir con la normativa.

La remoción eficiente de sólidos, grasas, metales e hidrocarburos contribuye significativamente a la reducción del impacto ambiental en cuerpos de agua receptores y ecosistemas acuáticos.

Aunque varios parámetros críticos cumplen con los límites permisibles, los resultados obtenidos demuestran que el método propuesto de coagulación-

floculación funciona de manera altamente efectiva como tratamiento primario. Se logró alcanzar los valores normativos en todos los parámetros evaluados, excepto en DBO y DQO. Sin embargo, las remociones alcanzadas en estos dos indicadores fueron altamente satisfactorias, logrando reducciones significativas que preparan adecuadamente el agua residual para una etapa de tratamiento posterior, la cual, gracias al nivel de depuración logrado, no requerirá una eficiencia extrema pudiéndose resolver con tecnologías existentes y consolidadas, de bajo costo.

En cuanto al análisis económico, el costo operativo del tratamiento químico propuesto se estima en \$288.81 por metro cúbico, en comparación con el costo actual de \$350/m³ sin tratamiento primario, lo que representa un ahorro del 17.48% respecto a la opción actual. Estos resultados confirman que la implementación del método no solo es técnica y operativamente viable, sino también económicamente favorable, contribuyendo de manera significativa a la optimización de los costos de tratamiento de aguas residuales.

7.2. Recomendaciones

Para abordar las limitaciones identificadas y optimizar el proceso de tratamiento, se proponen las siguientes recomendaciones:

Se recomienda realizar una investigación complementaria para evaluar una etapa de tratamiento adicional efectiva que complemente el proceso de coagulación-floculación, con el fin de garantizar el cumplimiento de los límites establecidos para DBO y DQO. Los tratamientos biológicos pueden integrarse en fases posteriores a la coagulación, aprovechando la reducción previa de sólidos. Para cumplir con la normativa vigente, se requiere alcanzar una eficiencia mínima del 92.7%.

Al implementar este proceso, se debe considerar que el mismo implica establecer un plan de monitoreo periódico para evaluar el desempeño del tratamiento y asegurar la conformidad con los límites según lo indicado en el Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales N.º 33601. Haciendo uso de las pruebas de jarras como método de ajuste de las dosis previo a cada lote de agua a tratar.

Realizar análisis frecuentes de los parámetros de DBO, DQO, SST, metales y GyA para detectar posibles desviaciones en la calidad del agua tratada.

Se recomienda que, previo a cualquier implementación, se lleve a cabo un análisis económico que evalúe los costos asociados a la inversión inicial, los gastos de mantenimiento y operativos a largo plazo. Este estudio deberá compararse con los costos actuales derivados de la tercerización del tratamiento y gestión de las aguas, permitiendo así una toma de decisiones fundamentada en términos de viabilidad financiera, eficiencia operativa y sostenibilidad económica.

Bibliografía

- Aceropedia. (2023). Aceropedia. <https://aceropedia.com/tipos-de-acero/acero-negro/>
- Adetunji, A. I., & Ademola Olufolahan, O. (2021, mayo). Treatment of industrial oily wastewater by advanced technologies: a review. *Springer Nature*, 98 (11), 11-19. doi:<https://doi.org/10.1007/s13201-021-01430-4>
- Adhar, s., Lukman, Khalil, M., Ayuzar, E., Erlangga, Rusydi, R., . . . Muliani. (2022, enero). Influence of Rainfall and Spatial Temporal Distribution Analysis of Total Suspended Solid in Laut Tawar Lake. *IOPscience* (1062), 1-15. doi:10.1088/1755-1315/1062/1/012022
- Aghabalaei, V., Fazeli, M., Reza, K., & Abbas, S. (2013, marzo). Evaluation of the metalwork cutting fluid treatment performance using fenton oxidation process in comparison with coagulation-flocculation. *Researchgate.net*, (2), 90-98 https://www.researchgate.net/publication/341621900_Fenton
- Barrios Guerrero, J., & Martínez Zarante, T. (2023). Eficiencia de la semilla de mangifera indica (mango de hilacha) como coagulante orgánico en una muestra de agua residual doméstica [Tesis de Licenciatura] <https://repositorio.cuc.edu.co/entities/publication/3b39ba26-5dac-40f6-9be3-c0bb85d5b727>
- Belenio Saéñz, K., Coll Velazquez, J. P., De la Hoz, J., Reyes Muñoz, J., Donado Gómez, A., Castellar, G., & Díaz Sáenz, C. (2022, marzo). Tratamiento de aguas residuales de la industria metalúrgica. *Revista Científica Cuc*, 3 (1), 19-33. doi:<https://doi.org/10.17981/cesta.03.01.2022.03>
- Bramfitt, B. (2015, febrero). Carbon and Alloy Steels. *Manual del Ingeniero mecánico* 1 (1), 20-25. doi:<https://doi.org/10.1002/9781118985960.meh101>
- Bustamante López, V. R., & Chacón Vera, Y. C. (26 de febrero de 2024). Tratabilidad del agua residual industrial generada de una actividad metalmecánica. [Tesis de Licenciatura] <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/27482/1/UPS-GT004994.pdf>
- Cabrera Bermúdez, X., Fleites Ramírez, M., & Contreras Moya, A. (diciembre de 2009). Estudio del proceso de Coagulación -Floculación de aguas residuales de la empresa textil "Desembarco del Granma" a escala de laboratorio. *Redalyc*, 29(3), 64-73. <https://www.redalyc.org/pdf/4455/445543760009.pdf>
- Carrasquero, S., Terán, K., Mas, M., Colina, R. G., & Díaz, A. (2020, septiembre). Evaluación de un tratamiento fisicoquímico. *Revista Arbitrada Venezolana del Núcleo Luz- Costa Oriental del Lago*, 10(2), 122-139. <https://produccioncientificaluz.org/index.php/impacto/article/view/33918>

- Cheng, C., Phipps, D., & Alkhaddar, R. (2005, octubre). Tratamiento de fluidos de trabajo de metales usados. *ScienceDirect*, 39(17), 4051-4063. doi:<https://doi.org/10.1016/j.watres.2005.07.012>
- Chipasa, K. (2013). Best Practice Guide for the Disposal of Water-mix Metalworking Fluids. UKLA: <https://www.ukla.org.uk/wp-content/uploads/UKLA-PERA-Best-Practice-Guide-for-the-Disposal-of-Water-mix-Metalworking-Fluids.pdf>
- Coto Arguello, R. (2017). Perfil estadístico del sector metalmeccánico costarricense. Asometal. <https://www.asometal.com/aso/wp-content/uploads/2017/12/Perfil-estad%C3%ADstico-del-sector-metalmec%C3%A1nico-costarricense.pdf>
- Cruz Espina, C. E. (17 de noviembre de 2022). Implementación y validación del Método 5540-C para la determinación de surfactantes aniónicos como sustancias activas al azul de metileno (SAAM) en muestras de aguas residuales y superficiales. [Trabajo Final de Graduación]. <http://www.repositorio.usac.edu.gt/17979/>
- Escuela de Post Grado Industrial. (2020, septiembre). Fluidos de corte principales funciones e inconvenientes del uso. Escuela de postgrado industrial. <https://postgradoindustrial.com/fluidos-de-corte-funciones/>
- Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2014). Metodología de la investigación. En *Metodología de la investigación*. McGRAW-HILL / INTERAMERICANA. https://apiperiodico.jalisco.gob.mx/api/sites/periodicooficial.jalisco.gob.mx/files/metodologia_de_la_investigacion_-_roberto_hernandez_sampieri.pdf
- Garcés Elsitdié, J. F. (2012). Diseño de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Producción (PTAR) para una empresa Metalmeccánica (Racks del Pacífico). [Tesis de Grado]. <https://repositorio.uisek.edu.ec/handle/123456789/1899>
- Ghaly, A. E., Snow, A., & Faber, B. (2007, marzo). Treatment of grease filter washwater by chemical coagulation. *American Journal of Environmental Sciences*, 3(1), 19-29. doi:<https://doi.org/10.3844/ajessp.2007.19.29>
- Gholamreza, A., Hossein, Z., Vahid, M., & Mostafa, D. (25 de Marzo de 2018). Selection of coagulant using jar test and analytic hierarchy process: A case study of Mazandaran textile wastewater. *Avances en la investigación ambiental*, 7(1), 1-11. doi:doi.org/10.12989/aer.2018.7.1.001
- Gil Morales, J. A., Rincón Roza, T., & Salinas Garzón, E. (2022, febrero). Tratamiento de grasas y aceites por medio de bacterias lipolíticas en aguas residuales de industria metalmeccánica. *Revista especializada en ingeniería*, 16(1), 1-11. doi:<https://doi.org/10.22490/25394088.5632>
- Ibarra Rodríguez, D. (Agosto de 2020). Análisis integral y optimización de un proceso de floculación-coagulación empleando pectina de nopal para el tratamiento de aguas contaminadas con metales de la industria de la galvanoplastia. [Tesis de Doctorado]

<https://cideteq.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1021/453/1/TESIS%20DIANA%20IBARRA%20RODRIGUEZ%20DOC%202020%20a.pdf>

Instituto del Agua. (s.f.). Coagulación en el Tratamiento de Aguas Residuales: Método Eficaz para un Mundo Sostenible. Instituto del Agua. <https://institutodelagua.es/aguas-residuales/coagulacion-tratamiento-de-aguas-residualesaguas-residuales/>

Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (INSST). (1994). NFP 317 Fluidos de corte criterios de control de riesgos higienicos INSST. Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo. <https://www.insst.es/documentacion/colecciones-tecnicas/ntp-notas-tecnicas-de-prevencion/9-serie-ntp-numeros-296-a-330-ano-1994/ntp-317-fluidos-de-corte-criterios-de-control-de-riesgos-higienicos>

Javad, T., Hasan, P., Mitra, G., Shahrbanou, Y., Vahide, O., & Mahdi, F. (2020, junio). On-site carwash wastewater treatment and reuse: a systematic review. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 102, 3613-3627. <https://doi.org/10.1080/03067319.2020.1772773>

Leitón Aguero, L. (2017). Proceso de coagulación-floculación de aguas residuales de sodas- comedor del Tecnológico de Costa Rica, Sede Central, [Trabajo Final de Graduación]. <https://hdl.handle.net/2238/7393>

Lizarazo Estupiñán, P. A., & Villota Santamaría, K. V. (Agosto de 2017). Desarrollo de una propuesta de un sistema para el tratamiento de aguas residuales provenientes del tratamiento térmico realizado por una empresa metalmecánica [Proyecto de Grado]. <https://repository.uamerica.edu.co/bitstreams/af99b3fa-a7ec-4fc4-b6e1-9b01e53a0205/download>

López Badilla, G., Sánchez Ocampo, C., Paz Delgadillo, J., & Ling López, J. (2016, diciembre). Análisis de corrosión en aceros con recubrimientos impacta en la competitividad en la industria metalmecánica de Mexicali. *Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguas Calientes*(69), 39-46. doi:<https://doi.org/10.33064/iycuaa2016691868>

Lorenzo- Acosta, Y. (2006). Estado del arte del tratamiento de aguas por coagulación-floculación. *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, XL(2), 10-17. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223120664002>

Manggle. (2023). Beneficios del reciclaje y la reutilización del agua tratada en industrias. *Manggle.com*. <https://www.manggle.com.co/>

Mazumder, D., & Mukherjee, S. (2011, febrero). Treatment of Automobile Service Station. *International Journal of Environmental Science and Development*, 2(1), 64-69. doi:DOI:10.7763/IJESD.2011.V2.98

Metales Flix. (2022). Metales Flix. <https://www.metalesflix.com/acerca.cfm>

- Metalmecánica. (2024). Metalmecánica.
<https://www.metalmecanica.com/es/noticias/propiedades-fabricacion-y-tipos-de-acero-al-carbono>
- MINAE. (2010). Sistema Costarricense de Información Jurídica.
http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?nValor1=1&nValor2=59524
- Ministerio de Ambiente y Energía. (2010). Sistema Costarricense de Información Jurídica.
http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?nValor1=1&nValor2=59524
- Ministerio de Salud. (2010). SINALEVI.
http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=68197&nValor3=81183&strTipM=TC
- Morelos Gómez, J., Gómez-Yaspe, I., & De Jesús de Ávila-Suarez, R. (2021, enero). Capacidades de innovación de las pequeñas y medianas empresas del sector metalmecánico en Cartagena, Colombia. Signatory of Dora, Universidad Libre de Colombia 17(1), 12-29. doi:<https://doi.org/10.18041/1900-3803/entramado.1.7215>
- Nabi Bidhendi, G., Torabian, A., Ehsani, H., & Razmkhah, N. (2007, enero). Evaluation of industrial dyeing wastewater treatment with coagulants and polyelectrolyte as a coagulant aid. Iranian Journal of Environmental Health Science & Engineering, 4(1), 29-36.
https://www.researchgate.net/publication/26488572_Evaluation_of_industrial_dyeing_wastewater_treatment_with_coagulants_and_polyelectrolyte_as_a_coagulant_aid
- Orozco Lab. (2023). Orozco Lab. <https://www.orozcolab.info/que-es-el-ph-como-se-mide-cual-es-su-importancia>.
- Pabón, S., Benítez, R., Sarria, R., & Gallo, J. (2020, junio). Contaminación del agua por metales pesados, métodos de análisis y tecnologías de remoción. Entre Ciencia e Ingeniería, 14(27), 9-18. doi:<https://doi.org/10.31908/19098367.1734>
- Paniagua Segovia, O. (2017). Evaluación de la calidad del agua para consumo humano y fines agrícolas en las cuencas de la Región Huancavelica. [Tesis Profesional de Ingeniería]. <https://repositorio.unsch.edu.pe/items/6573c629-ad86-4c01-a7f0-e2f6179ab4d1>
- Pivokonský, M., Novotná, Kateřina, Čermáková, Lenka, & PetříčekJar, Radim. (2022, abril). Jar Tests for Water Treatment Optimisation: How to Perform Jar Tests – a Handbook. IWA Publishing (1), 1-47. doi:<https://doi.org/10.2166/9781789062694>

- Potter, N., & Hotchkiss, J. (1995). Grasas, aceites y productos relacionados. *Ciencia de los alimentos*. Springer Nature, (1), 359-380. doi:https://doi.org/10.1007/978-1-4615-4985-7_16
- Procomer. (2020). Procomer de Costa Rica. <https://www.procomer.com/noticia/sector-metalmecanico-tiene-oportunidades-para-crecer-en-segmentos-de-valor-agregado/>
- Quirós Bustos, N., Robles Chaves, D., Caballero Chavarría, A., & Calvo Brenes, G. (2022, junio). Contenido de metales pesados en varios ríos de Costa Rica. *Revista Tecnología en marcha*, 35(2), 93-104. doi:<http://dx.doi.org/10.18845/tm.v35i2.5532>
- Raffo Lecca, E., & Ruiz Lizama, E. C. (2014, marzo). Caracterización de las aguas residuales y la demanda bioquímica de oxígeno. *Dialnet*, 17(1), 71-80. <https://dialnet.unirioja.es/download/articulo/8635432.pdf>
- Rahman, Z., & Singh, V. (2019, junio). The relative impact of toxic heavy metals (THMs) (arsenic (As), cadmium (Cd), chromium (Cr)(VI), mercury (Hg), and lead (Pb)) on the total environment. (E. M. Assessment, Ed.) *Springer Nature*, 191(419), 1. doi:<https://doi.org/10.1007/s10661-019-7528-7>
- Reyes Quezada, J., & Cervantes Cabello, J. (25 de septiembre de 2023). Metodología para impresión de piezas metálicas mediante manufactura aditiva. [Tesis Profesional de Ingeniería]. <https://hdl.handle.net/20.500.14330/TES01000848608>
- Silver Tubos. (2024). Silver Tubos. <https://silvertubos.com/tuberias/tuberia-galvanizada/>
- Simón, X., Penru, Y., Guastalli, A., Llorens, J., & Baig, S. (2011, julio). Mejora del análisis de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) del agua del mar Mediterráneo mediante el control de la siembra. *Science Direct*, 85(1), 527-532. doi:<https://doi.org/10.1016/j.talanta.2011.04.032>
- Tejada Tovar, C., Villabona Ortiz, Á., & Garcés Jaraba, L. (2015, junio). Adsorción de metales pesados en aguas residuales usando materiales de origen biológico. *Tecnológicas*, 18 (34), 109-123. <https://dialnet.unirioja.es/download/articulo/5062883.pdf>
- Tirado Amador, L., González Martínez, F., Martínez Hernández, L., Wilches Vergara, L. A., & Celedón Suárez, J. N. (2015, febrero). Niveles de metales pesados en muestras biológicas y su importancia en salud. *Revista Nacional de Odontología*, 11(21), 82-98. doi:<https://doi.org/10.16925/od.v11i21.895>
- Zhang, D., Sun, S., Qiu, D., Gibson, M. A., Dargusch, M. S., Brandt, M., . . . Easton, M. (2018, febrero). Metal Alloys for Fusion-Based Additive Manufacturing. *Advanced Engineering Materials* 20 (5), 17-45. doi:<https://doi.org/10.1002/adem.201700952>

Anexos

Anexo 1. Carta de Presentación

Alajuela, 29 de julio de 2024

Señor

Carlos Mora Sánchez

Ingeniería en Salud Ocupacional y Ambiente, Sede Central


Universidad Técnica Nacional

Estimado señor:

Por este medio presentamos para su aprobación el tema denominado: **Desarrollo de una propuesta de tratamiento para las aguas residuales del proceso de elaboración de tubos metálicos en la empresa Metales Flix**, bajo la modalidad: **Proyecto de graduación**, para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería en Salud Ocupacional y Ambiente, según la normativa vigente.

Agradecemos su atención

Atentamente,



Marilyn Chaves Arroyo

401780979



Maricruz Alvarez Moya

111420519

Anexo 2. Carta Filólogo

San José, 16 de julio de 2025

Señores (as)
Universidad Técnica Nacional
SEDE CENTRAL
LICENCIATURA EN INGENIERÍA EN SALUD OCUPACIONAL Y AMBIENTE

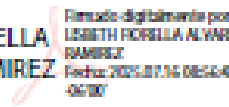
Estimados señores (as)

Por este medio notifico formalmente que en mi calidad de Filóloga he revisado minuciosamente el Trabajo Final de Graduación de las estudiantes Maricruz Álvarez Moya y Marilyn Chaves Arroyo, denominado *“Desarrollo de una propuesta de tratamiento primario para las aguas residuales del proceso de elaboración de tubos metálicos en la empresa Metales Fibc”*, para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería en Salud Ocupacional y Ambiente.

Corregí el trabajo en aspectos tales como: construcción de párrafos, vicios del lenguaje que se trasladan a lo escrito, ortografía, puntuación y otros relacionados con el campo filológico y según lo establecido por APA 4, versión homologada en español de APA 7. Desde ese punto de vista considero que está listo para ser presentado como Trabajo Final de Graduación; por cuanto cumple con los requisitos establecidos por la Universidad.

Suscribe de Ustedes cordialmente,

LISBETH FIORELLA
ALVAREZ RAMIREZ



Firmado digitalmente por
LISBETH FIORELLA ALVAREZ
RAMIREZ
Fecha: 2025.07.16 08:54:43
-05'00'

Lic. Fiorella Alvarez Ramirez
Cédula 401890154
Código Colypro 43535

Anexo 3. Carta de autorización para uso y manejo de TFG

CARTA DE AUTORIZACIÓN PARA USO Y MANEJO DE LOS TRABAJOS FINALES DE GRADUACIÓN UNIVERSIDAD TECNICA NACIONAL

Alajuela,

07 de agosto de 2025

Señores/ as

Vicerrectoría de Investigación

Sistema Integrado de Bibliotecas y Recursos Digitales

Estimados señores:

Nombre completo de sustentantes	Número de identificación
Maricruz Álvarez Moya	111420519
Marilyn Chaves Arroyo	401780979

Nosotros en calidad de autores del trabajo de graduación titulado:

“Desarrollo de una propuesta de tratamiento primario para las aguas residuales del proceso de elaboración de tubos metálicos en la empresa Metales Flix”

El cual se presenta bajo la modalidad de:

_____ Seminario de Graduación

 x Proyecto de Graduación

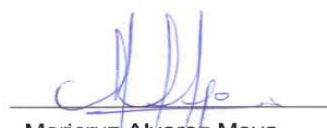

_____ Tesis de Graduación

Presentado en la fecha 07/08/2025, autorizamos a la Universidad Técnica Nacional, sede Central, para que nuestro trabajo pueda ser manejado de la siguiente manera:

Autorizamos	
Marque con una X o un ✓	
Conservación de ejemplares para préstamo y consulta física en biblioteca	✓
Inclusión en el catálogo digital del SIBIREDI (Cita catalográfica)	✓
Comunicación y divulgación a través del Repositorio Institucional	✓
Divulgación del resumen en el repositorio UTN con una cantidad de 200 a 500 palabras (Describe en forma breve el contenido del documento)	✓
Consulta electrónica con texto protegido	✓
Descarga electrónica del documento en texto completo protegido	✓
Inclusión en bases de datos y sitios web que se encuentren en convenio con la Universidad Técnica Nacional contando con las mismas condiciones y limitaciones aquí establecidas	✓

Por otra parte, declaramos que el trabajo que aquí presentamos es de plena autoría, es un esfuerzo realizado de forma conjunta, académica e intelectual con plenos elementos de originalidad y creatividad. Garantizamos que no contiene citas, ni transcripciones de forma indebida que puedan devenir en plagio, pues se ha utilizado la normativa vigente de la American Psychological Association (APA). Las citas y transcripciones utilizadas se realizan en el marco de respeto a las obras de terceros. La responsabilidad directa en el diseño y presentación son de competencia exclusiva, por tanto, se exime de toda responsabilidad a la Universidad Técnica Nacional.

Conscientes de que las autorizaciones no reprimen nuestros derechos patrimoniales como autores del trabajo. Confiamos en que la Universidad Técnica Nacional respete y haga respetar nuestro derecho de propiedad intelectual.

Nombre del estudiante	Cédula	Firma
Maricruz Álvarez Moya	111420519	 Maricruz Álvarez Moya 111420519
Marilyn Chaves Arroyo	401780979	 Marilyn Chaves Arroyo 401780979

Día: 07 de agosto de 2025

Anexo 4. Carta del Tutor aprobación proyecto

Alajuela, 26 de junio de 2025

Máster

Carlos Mora Sánchez

Director de Carrera de Ingeniería en Salud Ocupacional y Ambiente

Universidad Técnica Nacional, Sede Central

Estimados señores

El suscrito MSc. Ing. Javier Chacón Barrantes, docente de la carrera de Ingeniería en Salud Ocupacional y Ambiente de la Sede Central de la Universidad Técnica Nacional, en mi condición de Profesor Tutor del Trabajo Final de Graduación, certifico que he participado, revisado y aprobado el proyecto titulado **"Desarrollo de una propuesta de tratamiento primario para las aguas residuales del proceso de elaboración de tubos metálicos en la empresa Metales Flix"** presentado por las estudiantes **Maricruz Álvarez Moya** cédula 111420519 y **Marilyn Chaves Arroyo** cédula 401780979.

Luego de una revisión exhaustiva, confirmo que dicho proyecto cumple con los requisitos académicos y metodológicos establecidos en el Reglamento de Trabajos Finales de Graduación de la Universidad Técnica Nacional. Por lo tanto, considero que se encuentra en condiciones de ser presentado ante la Comisión de Trabajo Final de Graduación para continuar con las etapas correspondientes.

Atentamente

MSc. Ing. Javier Chacón Barrantes

Profesor Tutor

Anexo 5. Carta del Lectores aprobación proyecto

Alajuela, 26 de junio de 2025

Máster
Carlos Mora Sánchez
Director de Carrera de Ingeniería en Salud Ocupacional y Ambiente
Universidad Técnica Nacional, Sede Central

Estimados señores

El suscrito Licda. Gabriela Villalobos Porras, docente de la carrera de Ingeniería en Salud Ocupacional y Ambiente de la Sede Central de la Universidad Técnica Nacional, en mi condición de Lector del Trabajo Final de Graduación, certifico la lectura y aval del proyecto titulado "**Desarrollo de una propuesta de tratamiento primario para las aguas residuales del proceso de elaboración de tubos metálicos en la empresa Metales Flix**" presentado por las estudiantes **Maricruz Álvarez Moya** cédula 111420519 y **Marilyn Chaves Arroyo** cédula 401780979.

Hago constar que he revisado el proyecto, brindando las observaciones correspondientes durante su desarrollo. En virtud de lo anterior, otorgo mi aval para su presentación ante la Comisión de Trabajo Final de Graduación, considerando que cumple con las normas y requisitos establecidos por la universidad para este fin.

Sin otro particular, me despido atentamente.


Licda. Gabriela Villalobos Porras

Profesor Lector

Alajuela, 26 de junio de 2025

Máster
Carlos Mora Sánchez
Director de Carrera de Ingeniería en Salud Ocupacional y Ambiente
Universidad Técnica Nacional, Sede Central

Estimados señores

El suscrito Lic. Agustín Rodríguez Carvajal, docente de la carrera de Ingeniería en Salud Ocupacional y Ambiente de la Sede Central de la Universidad Técnica Nacional, en mi condición de Lector del Trabajo Final de Graduación, certifico la lectura y aval del proyecto titulado "**Desarrollo de una propuesta de tratamiento primario para las aguas residuales del proceso de elaboración de tubos metálicos en la empresa Metales Flix**" presentado por las estudiantes **Maricruz Álvarez Moya** cédula 111420519 y **Marilyn Chaves Arroyo** cédula 401780979.

Hago constar que he revisado el proyecto, brindando las observaciones correspondientes durante su desarrollo. En virtud de lo anterior, otorgo mi aval para su presentación ante la Comisión de Trabajo Final de Graduación, considerando que cumple con las normas y requisitos establecidos por la universidad para este fin.

Sin otro particular, me despido atentamente.



Lic. Agustín Rodríguez Carvajal
Profesor Lector

Anexo 6. Carta del Tutor aprobando anteproyecto



Sede Central
Ingeniería en Salud Ocupacional y Ambiente

Alajuela, 08 de agosto de 2024

Señor
Carlos Mora Sánchez
Director de Carrera
Ingeniería en Salud Ocupacional y Ambiente
Sede Central

He leído y hecho las observaciones al anteproyecto que lleva como título **Desarrollo de una propuesta de tratamiento para las aguas residuales del proceso de elaboración de tubos metálicos en la empresa Metales Flix**, de los estudiantes

1. Ing. Marilyn Chaves Arroyo
2. Ing. Maricruz Alvarez Moya

Y con base al artículo 19 inciso a) del Reglamento de Trabajos Finales de Graduación de la Universidad Técnica Nacional, avaló el anteproyecto antes mencionado.

Atentamente



Javier Chacón Barrantes
Tutor

Anexo 7. Carta del Tutor y lectores avalando anteproyecto



Sede Central
Ingeniería en Salud Ocupacional y Ambiente

Alajuela, 08 de agosto de 2024

Señor
Carlos Mora Sánchez
Ingeniería en Salud Ocupacional y Ambiente, Sede Central
Universidad Técnica Nacional

Estimado señor:

Por este medio nosotros los firmantes aceptamos la sugerencia de ser participantes en el Trabajo Final de Graduación denominado: **Desarrollo de una propuesta de tratamiento para las aguas residuales del proceso de elaboración de tubos metálicos en la empresa Metales Flix**, para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería en Salud Ocupacional y Ambiente, y consecuentemente, sus deberes y funciones con respecto a este proceso, según las funciones indicadas en la normativa aplicable, para ello declaro que cuento con el nivel mínimo de Licenciatura y comprobada afinidad con la temática.

Docente sugerido como profesor Tutor

Nombre completo del docente	Número de cédula
Javier Chacón Barrantes	401840521

Docentes sugeridos como profesores Lectores

Nombre completo del docente	Número de cédula
Agustin Rodríguez Carvajal	106420932
Gabriela Villalobos Porras	205070792

Atentamente,


Javier Chacón Barrantes
Profesor Tutor


Agustin Rodríguez Carvajal
Profesor Lector


Gabriela Villalobos Porras
Profesor Lector

Anexo 8. Carta de autorización de la institución



Alajuela, 29 de julio de 2024

Sres.
Universidad Técnica Nacional
Comisión de Trabajo Finales de Graduación

Estimados señores:

Por medio de la presente, me dirijo a ustedes para saludarles cordialmente e informarles que autorizo a las ingenieras Marilyn Chaves Arroyo y Maricruz Alvarez Moya, para que puedan llevar a cabo dentro de la empresa Metales Flix S.A su proyecto de graduación denominado **“Desarrollo de una propuesta de tratamiento para las aguas residuales del proceso de elaboración de tubos metálicos en la empresa Metales Flix”**, para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería en Salud Ocupacional y Ambiente.

Se despide cordialmente,

A handwritten signature in blue ink, consisting of several overlapping loops and lines, positioned above a horizontal line.

Mario Parajeles Zumbado

Gerente General

Anexo 9. Carta de aval profesora del curso



Sede Central
Ingeniería en Salud Ocupacional y Ambiente

Alajuela, 01 de agosto de 2024

Señor
Carlos Mora Sánchez
Director de Carrera
Ingeniería en Salud Ocupacional y Ambiente
Sede Central

Como docente asignado al curso ISOA-1324 Investigación Dirigida y con base al artículo 19 inciso b) del Reglamento de Trabajos Finales de Graduación de la Universidad Técnica Nacional, avaló el anteproyecto de las siguientes personas:

1. Ing. Marilyn Chaves Arroyo
2. Ing. Maricruz Alvarez Moya

Que lleva como título **Desarrollo de una propuesta de tratamiento para las aguas residuales del proceso de elaboración de tubos metálicos en la empresa Metales Flix.**

Atentamente

MARIANELA
ROJAS
GARBANZO
(FIRMA)

Firmado digitalmente
por MARIANELA ROJAS
GARBANZO (FIRMA)
Fecha: 2024.08.17
06:32:03 -06'00'

Dra. Marianela Rojas Garbanzo, PhD
Docente del curso ISOA-1324

Anexo 10. Análisis de Laboratorio Agua Cruda



Telfax: 2219-8816 / Apartado 285-2400 Desamparados, San José

e-mail: mianalitica@gmail.com / Web: mianalitica.com

Resultado N°: 240924-C

INFORME DE ENSAYO QUIMICO**FECHA:** 24 DE SEPTIEMBRE DE 2024**CLIENTE:** Srta. MARILYN CHAVES ARROYO

DESCRIPCION: MUESTRAS DE AGUA RESIDUAL TOMADA DE LA PILETA DE ENFRIAMIENTO DE LA EMPRESA METALES FLIX, RECOLECTADA POR EL SR. RODOLFO GOMEZ CARPIO, FUNCIONARIO DE MICROBIOLOGIA ANALITICA EL DIA 20 DE SEPTIEMBRE DE 2024 EN ALAJUELA, SAN RAFAEL, 750 METROS AL ESTE Y 250 METROS AL SUR DE LA IGLESIA CATOLICA, CONTIGUO A CEMEX.

ANALISIS:

PARAMETRO	RESULTADO	METODOS
Temperatura en el momento del muestreo	27,2 ± 0,1°C	2550 B
pH	9,1 ± 0,1	4500-H ⁺ B
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO _{5,20})	53000 ± 2650 mg/L	5210 B
Demanda química de oxígeno (DQO)	104000 ± 5200 mg/L	5220 D
Sólidos sedimentables	<0,1 mL/L	2540 F
Sólidos suspendidos totales	22340 ± 1120 mg/L	2540 D
Grasas y aceites	4170 ± 100 mg/L	5520 C
Sustancias activas al azul de metileno (SAAM)	6,9 ± 0,4 mg/L	5540 C
Hidrocarburos totales	1985 ± 100 mg/L	5520 F
Aluminio	10,4 ± 0,2 mg/L	3500-AI B
Cromo	0,095 ± 0,001 mg/L	3500-Cr B
Zinc	20 ± 1 mg/L	3500-Zn B

METODOLOGIA DE ANALISIS:

APHA/AWWA STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER, 24TH EDITION, 2023.

OBSERVACIONES:

MUESTRA CODIGO MA: 200924-17.

Firmado digitalmente por
RICARDO MONTALBERT SMITH
ECHEVERRIA (FIRMA)
Fecha: 2024.09.24 09:07:06
+06'00'

M. Sc. RICARDO MONTALBERT-SMITH E.
N.I. CQCR 2285



NOTA: Reférase al código de esta muestra para cualquier consulta. Este informe no puede ser reproducido en forma parcial o total, sin la aprobación escrita del laboratorio. Certificado nulo sin la firma digital del colegiado.

N° DE PSF: CS-ARS-D-PSF-2694-2022 RGE: 12/01/2023, VENCE: 22/01/2025

MA-REG-07 / PAGINA 1 DE 1

MICROBIOLOGIA ANALITICA

Anexo 11. Análisis de Laboratorio Agua Pretratada



Telfax: 2219-8816 / Apartado 285-2400 Desamparados, San José

e-mail: mianalitica@gmail.com / Web: mianalitica.com

Resultado N°: 111124-F

INFORME DE ENSAYO QUIMICO

FECHA: 11 DE NOVIEMBRE DE 2024

CLIENTE: METALES FLIX

DESCRIPCION: MUESTRAS DE AGUA RESIDUAL, RECIBIDAS POR EL PERSONAL DE MICROBIOLOGIA ANALITICA EL DIA 8 DE NOVIEMBRE DE 2024.

ANALISIS:

PARAMETRO	24500	WY220B AI	WY220C Fe	METODOS
Demanda química de oxígeno (DQO)	2060 ± 41 mg/L	2630 ± 53 mg/L	2580 ± 52 mg/L	5220 D
Sólidos suspendidos totales	26 ± 3 mg/L	-----	-----	2540 D
Grasas y aceites	<4 mg/L	-----	-----	5520 C
Aluminio	0,4 ± 0,2 mg/L	-----	-----	3500-AI B
Zinc	2 ± 1 mg/L	-----	-----	3500-Zn B

METODOLOGIA DE ANALISIS:

APHA/AWWA STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER, 24TH EDITION, 2023.

OBSERVACIONES:

MUESTRA CODIGO MA: 080924-7 A 9.

Firmado digitalmente por
RICARDO MONTALBERT SMITH
ECHEVERRIA (FIRMA)
Fecha: 2024.11.11 22:48:31
-06'00'

M. Sc. RICARDO MONTALBERT-SMITH E.
N.I. CQCR 2285



NOTA: Refiérase al código de esta muestra para cualquier consulta. Resultados de análisis válidos únicamente para la muestra enviada por el cliente. Se satisface que los datos son actuales y relevantes a su uso particular. Este informe no puede ser reproducido en forma parcial o total, sin la aprobación escrita del laboratorio. Certificado nulo sin la firma digital del colegiado.

N° DE PSF: CS-ARS-D-PSF-2694-2022 RIGE: 12/01/2023, VENCE: 22/01/2025

MA-REG-07 / PAGINA 1 DE 1

MICROBIOLOGIA ANALITICA

Anexo 12. Ficha Técnica Floculante TS 08 FA

BOLETÍN TÉCNICO: 041

Fecha de revisión: 15/05/2023



FICHA TÉCNICA

AQUAFLOC TS 08 FA

El nombre AQUAFLOC comprende una gama completa de coagulantes y floculantes sintéticos de distintos pesos moleculares y diversa funcionalidad iónica, apropiados para la separación de fases sólido / líquido en un amplio espectro de procesos químicos y de tratamiento de aguas, tanto residuales como con aplicaciones en potabilización.

De forma más específica, el AQUAFLOC TS 08 FA es un floculante a base de poliácridamida de alto peso molecular y alta carga catiónica.

Se obtienen altos niveles de efectividad para la flotación de biomasa en unidades de flotación secundaria además puede ser utilizado también en deshidratación de lodos en equipos como centrifugos, filtros de banda, filtros de anillos móviles y otros. Se puede utilizar juntamente con los coagulantes habituales en el tratamiento de aguas, sean orgánicos, inorgánicos o mezcla de ambos.

De forma general, se recomienda efectuar una solución del producto a una concentración del 0,1-0,5%. El tiempo necesario para la preparación de esta solución es de 45 minutos, con una agitación adecuada, superior al 500 rpm.

La vida de la solución depende de la concentración y del tipo de agua utilizada. A mayor concentración y mejor calidad del agua, más larga vida tendrá la solución.

El producto se puede aplicar en forma diluida y preferiblemente con bomba dosificadora. Aplicar siempre en una zona

donde exista mezcla intensa que garantice un buen mezclado y dispersión del producto.

Las dosis de aplicación están relacionadas con las características del lodo a deshidratar. A título orientativo para la deshidratación de lodos se utilizan dosis de 10-20,-Kg/Ton de materia seca.

Propiedades:

Estado	Polvo
Aspecto	Granular Blanco
pH	4-6
Densidad Aparente	0,72 g / ml
Vida en Anaquel	24 meses
Viscosidad 0,25%	240 cps
Temp Almacenaje	0-35 ° C
Granulometría	2% >10 mesh 6% <100 mesh

Manipulación:

Evitar el derramamiento sobre superficies húmedas, en caso de derrame evitar el contacto con el agua.

Debe utilizarse el equipo de protección personal indicado en la FDS.

Presentación:

El producto se suministra en las siguientes presentaciones:

Saco	25 kg
Big-Bags	750 kg

Para más información sobre el uso de este producto consulte con nuestros ingenieros especializados quienes le orientaran para su aplicación específica.

Administración: (506) 2239-7244 Ingeniería: (506) 8833-4746 Proyectos: (506) 8882-6410

✉: administracion@wwt-ing.com

Anexo 13. Ficha Técnica Coagulante Z4500

BOLETÍN TÉCNICO: 043

Fecha de revisión:

25/09/2020

BOLETÍN TÉCNICO



AQUAFLOC Z 4500

El nombre AQUAFLOC comprende una gama completa de coagulantes y floculantes sintéticos de distintos pesos moleculares y diversa funcionalidad iónica, apropiados para la separación de fases sólido / líquido en un amplio espectro de procesos químicos y de tratamiento de aguas, tanto residuales como con aplicaciones en potabilización.

De forma más específica, el AQUAFLOC Z 4500 es una mezcla de polímeros orgánicos de altísimo peso molecular e inorgánicos, especialmente diseñado para coagulación de aguas residuales industriales en procesos como:

- Procesos de sacrificio animal
- Grasas y Aceites de Industria Alimenticia.
- Acondicionamiento de lodos
- Sedimentación de arenas y arcillas

Se obtienen altos niveles de efectividad para la flotación de sólidos en suspensión, aplicándolo por norma general antes de un floculante de los usados habitualmente en el tratamiento de aguas. Puede usarse en cualquier otra aplicación donde haya que coagular materia en suspensión. El producto se puede aplicar directamente con una bomba dosificadora al agua a tratar, o bien haciendo una disolución en agua. Aplicar siempre en una zona donde exista mezcla intensa que garantice un buen mezclado y dispersión del producto.

La dosis de aplicación está directamente relacionada con la cantidad y tipo de carga a coagular que lleva el agua a tratar.

A nivel orientativo las dosis usuales de trabajo están entre 1-200 ppm

Propiedades:

Estado	Líquido
Aspecto	Amarillo ligero
pH	4-6
Densidad	1,245 g / ml
Vida en Anaquel	2 años
Viscosidad	540 cps
Temp.Almacenaje	18-35 ° C

Manipulación:

Evitar el contacto con la piel y los ojos. Debe utilizarse el equipo de protección personal indicado en la MSDS.

Presentación:

El producto se suministra en las siguientes presentaciones:

Pichinga	25 kg
Estación	260 kg
Tanqueta	1300 kg

Para mayor información sobre el uso de este producto consulte con nuestros ingenieros especializados quienes le orientaran para su aplicación específica.

Anexo 14. Ficha Técnica Coagulante WY220B

BOLETÍN TÉCNICO: 016

Fecha de revisión: 14/12/2020



FICHA TÉCNICA

AQUAFLOC WY 220 - B

El nombre AQUAFLOC comprende una gama completa de coagulantes y floculantes sintéticos de distintos pesos moleculares y diversa funcionalidad iónica, apropiados para la separación de fases sólido / líquido en un amplio espectro de procesos químicos y de tratamiento de aguas, tanto residuales como con aplicaciones en potabilización.

De forma más específica, el AQUAFLOC WY 220 - B, es un coagulante inorgánico a base de polímeros de aluminio, caracterizándose por su alta concentración y su alta basicidad diseñado especialmente para la coagulación de aguas residuales industriales en procesos como:

- Remoción de color
- Potabilización de agua
- Procesos de sacrificio animal
- Aguas con altos contenidos grasos.

Se obtienen altos niveles de efectividad para la decantación de sólidos en suspensión, aplicándolo por norma general antes de un floculante de los usados habitualmente en el tratamiento de aguas. Puede usarse en cualquier otra aplicación donde haya que coagular materia en suspensión. El producto se puede aplicar directamente con una bomba dosificadora al agua a tratar, o bien haciendo una disolución en agua.

La dosis de aplicación está directamente relacionada con la cantidad y tipo de carga a coagular que lleva el agua a tratar.

A nivel orientativo las dosis usuales de trabajo están entre 10-500 ppm

Propiedades:

Estado	Claro
Aspecto	Incoloro
% Al Al_2O_3 min	20
% Basicidad relativa	80
Fe (ppm como Fe_2O_3)	100 max
Rango pH	2.5 – 4.6
Densidad	1.34 g / ml
Vida en Anaquel	1 año

Manipulación:

Dada la acidez del producto, evitar el contacto con la piel y los ojos.

Debe utilizarse el equipo de protección personal indicado en la FDS.

Presentación:

El producto se suministra en las siguientes presentaciones:

Pichinga	25 kg
Estañón	260 kg
Tanqueta	1300 kg

Para mayor información sobre el uso de este producto consulte con nuestros ingenieros especializados quienes le orientaran para su aplicación específica.

Anexo 15. Ficha Técnica Coagulante WY220C

BOLETÍN TÉCNICO: 015

Fecha de revisión: 14/12/2024



FICHA TÉCNICA

AQUAFLOC WY 220 C

El nombre AQUAFLOC comprende una gama completa de coagulantes y floculantes sintéticos de distintos pesos moleculares y diversa funcionalidad iónica, apropiados para la separación de fases sólido / líquido en un amplio espectro de procesos químicos y de tratamiento de aguas, tanto residuales como con aplicaciones en potabilización.

De forma más específica, el AQUAFLOC WY 220 -C, es un coagulante inorgánico a base de polímeros de aluminio, caracterizándose por su alta concentración y basicidad media. Es un producto con acidez libre especialmente diseñado para la coagulación de aguas residuales industriales en procesos como:

- Remoción de color
- Potabilización de agua
- Procesos de sacrificio animal
- Aguas con altos contenidos grasos.

Se obtienen altos niveles de efectividad para la decantación de sólidos en suspensión, aplicándolo por norma general antes de un floculante de los usados habitualmente en el tratamiento de aguas. Puede usarse en cualquier otra aplicación donde haya que coagular materia en suspensión. El producto se puede aplicar directamente con una bomba dosificadora al agua a tratar, o bien haciendo una disolución en agua.

La dosis de aplicación está directamente relacionada con la cantidad y tipo de carga a coagular que lleva el agua a tratar.

A nivel orientativo las dosis usuales de trabajo están entre 10-500 ppm

Propiedades:

Estado	Claro
Aspecto	Amarillo claro
% Al Al_2O_3 min	16-18
% Basicidad relativa	38-40
Rango pH al 15%	2.5 – 4.8
Densidad	1.34 g / ml
Vida en Anaquel	1 año

Manipulación:

Dada la acidez del producto, evitar el contacto con la piel y los ojos.

Debe utilizarse el equipo de protección personal indicado en la FDS.

Presentación:

El producto se suministra en las siguientes presentaciones:

Pichinga	25 kg
Estafón	260 kg
Tanqueta	1350 kg

Para mayor información sobre el uso de este producto consulte con nuestros ingenieros especializados quienes le orientaran para su aplicación específica.

Anexo 16. Cotización Tratamiento Aguas Residuales



Cartago, 20 de enero del 2025

COTIZACION N.º Q-TR5410

Marilyn Chaves Arroyo

Es de nuestro agrado presentarle la siguiente oferta de servicios de tratamiento y disposición de Residuos detallados en el anexo de esta oferta, en *Tipo de residuo*.

CONDICIONES GENERALES

Descripción de servicio	Gestión del residuo <ul style="list-style-type: none"> - Recolección del residuo en las instalaciones indicadas. - Transporte de los residuos a la planta de tratamiento en la zona Industrial de Cartago, en vehículo especial autorizado y en cumplimiento con el decreto N° 24715 MOPT-MEIC-S, Reglamento para el transporte terrestre de productos peligrosos. - Registro de la gestión (transporte y tratamiento) en el SIGREP. - Muestras y caracterización y pruebas de laboratorio para la determinación del tratamiento óptimo. - Tratamiento adecuado según el tipo de residuo. - Certificado de gestión
Condiciones de entrega de los residuos	Libres a bordo. El residuo debe ser entregado dentro del transporte proporcionado por Greco Chemical.
Plazo de entrega de los servicios	Una vez recibidos en planta los residuos, el tratamiento de los mismos y la entrega del certificado respectivo se dará en un máximo de 30 días hábiles. (En el momento de recibir el pago del servicio)
Vigencia de la oferta	30 días hábiles.
Términos de pago	Condiciones de pago: Crédito a 30 días contra factura entregada. Pagado en dólares de los Estados Unidos de América o en colones al tipo de cambio de VENTA de referencia del Banco Central de Costa Rica al día de la ejecución del pago. Acreedor: Greco Chemical Industrial S.A. Céd. Jur: 3-101-636088 Cuentas Banco Nacional de Costa Rica: Dólares : 200-02-070-000770-2, cuenta cliente: 151070 200200 07701 IBAN: CR81 0151 0702 0020 0077 01 Colones: 100-01-070-000078-0, cuenta cliente: 151070 100100 00781 IBAN: CR79 0151 0701 0010 0007 81

CONDICIONES ESPECIFICAS

Tipo de Residuo	Residuos peligrosos
Condiciones de embalaje	Residuos rotulados, embalados y entarimados, evitando derrames.



Residuo	Costo por kilo
Aguas Contaminadas (no tratadas) fuera de rango de pH 6-8	\$0,35
Aguas Contaminadas dentro de rango de pH 6-8	\$0,28

Atentamente.

Francela Bravo Chaves
Greco Chemical Industrial S.A.

Anexo 17. Cotización Coagulante y Floculante

W.W.T. INGENIERIA S.A.

Cedula Juridica 3-101-428824
 San José – Santa Ana – Brasil
 ID 10106
 5062239724
 susan.gutierrez@wwt-ing.com



W.W.T. INGENIERÍA S.A.

Cotización

ADDRESS

MARILYN CHAVES ARROYO
 San Antonio de Belén.
 Urbanización La Amistad casa
 71
 Cédula 401780979

SHIP TO

MARILYN CHAVES
 ARROYO
 San Antonio de Belén.
 Urbanización La Amistad
 casa 71
 Cédula 401780979

COTIZACIÓN # 1736

DATE 16/01/2025
EXPIRATION DATE 31/01/2025

PRODUCTO	DESCRIPCION	SKU	CANT	PRECIO	MONTO
C0014	AQUAFLOC Z 4500 - KG	3424002020000	25	1.70	42.50T
FP0025	AQUAFLOC TS 08 FA - KG	3479003009900	25	5.50	137.50T
SUBTOTAL					180.00
TAX					23.40
TOTAL					USD 203.40

Accepted By

Accepted Date

Anexo 18. Diagrama causa- efecto

