

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas

Diseño de un sistema de tratamiento de efluentes para un laboratorio químico dedicado al análisis de muestras de alimentos, suelos y ambientes

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero Químico

Presentado por:

Joselyn Estefanía Bello Barrera

Natalia Verónica Mendoza Samaniego

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2022

DEDICATORIA

El presente proyecto se lo dedico a mi madre, Zoila del Carmen Arguello, por haberme forjado como la persona que soy actualmente y mostrarme el camino hacia la superación.

A mis hermanos, Michelle y Steven, por nunca haber dejado de creer en mí y confiar incondicionalmente en mis decisiones.

A mi tía, Mariuxi Barrera, por abrirme las puertas de su hogar y no dejar que me rinda.

A mi familia, por haberme apoyado en toda mi formación académica.

A mis compañeros de trabajo, por haberme dado la oportunidad de crecer personal y profesionalmente con ellos, ya que con perseverancia y esfuerzo se logra el éxito.

Joselyn Estefanía Bello Barrera

DEDICATORIA

El presente proyecto se lo dedico primeramente a Dios por sus infinitas bendiciones y por permitirme cumplir esta meta. A mi mamá, por todo su apoyo a lo largo de mi carrera y por ser una persona incondicional para mí. A Santiago, por ser mi guía y mi fortaleza con sus sabios consejos. A mi abuelita y mi abuelito por darme ese amor y cariño constante y ser esa motivación para seguir adelante. A mis hermanos Ariel y Mindy por creer en mí y enseñarme a no rendirme.

Natalia Verónica Mendoza Samaniego

AGRADECIMIENTOS

Mi más sincero agradecimiento al Dr. Marco Guijarro e hijos, por brindarme su apoyo incondicional para culminar este proyecto.

Al Quím. Moris Veloz, por su tiempo, paciencia y conocimientos impartidos.

Al Quím. Pablo Saavedra, por haberme guiado con éxito en el desarrollo del trabajo.

A la Ing. Janina Prieto, por ser un pilar fundamental en la investigación.

Al Dr.-Ing. Christopher Varela y Mgtr. Christian Macías, por aceptar la tutoría y orientarme en el desarrollo del proyecto.

A todos los docentes de la Facultad de Ingeniería Química, por sus enseñanzas impartidas a lo largo de la carrera.

Por último, a mi amiga y futura colega, Natalia Mendoza, quien, a pesar de las dificultades presentadas durante la experimentación, me enseñó que no hay que darse por vencido y que todo esfuerzo da frutos.

Joselyn Estefanía Bello Barrera

AGRADECIMIENTOS

Primero quiero agradecer a Dios por permitirme culminar mis metas y guiarme siempre en mi camino.

A mis padres Santiago y Yasmila por brindarme su apoyo incondicional y sabios consejos del día a día.

A mis abuelitos Miguel y Bertha por inspirarme y ser un gran ejemplo de lucha constante.

A José Murillo por apoyarme y brindarme su apoyo constante.

A mis tutores, el Dr.-Ing. Christopher Varela y el Mgtr. Christian Macías por orientarme en el desarrollo del proyecto.

A todos los docentes de la Facultad de Ingeniería Química, por sus enseñanzas impartidas a lo largo de la carrera.

Por último, a mi amiga y futura colega Joselyn Bello por su constante dedicación y paciencia a lo largo del desarrollo del proyecto.

Natalia Verónica Mendoza Samaniego

DECLARACIÓN EXPRESA

"Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Joselyn Estefanía Bello Barrera* y *Natalia Verónica Mendoza Samaniego* damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"



Joselyn Estefanía
Bello Barrera



Natalia Verónica
Mendoza Samaniego

EVALUADORES

NADIA MAGALY FLORES
MANRIQUE

Firmado digitalmente por
NADIA MAGALY FLORES
MANRIQUE
Fecha: 2022.10.08 18:09:37
-05'00'

M.Sc. Nadia Flores

PROFESOR DE LA MATERIA

CHRISTOPHER
R OSWALDO
VARELA
BARRENO

Digitally signed
by CHRISTOPHER
OSWALDO
VARELA BARRENO
Date: 2022.09.05
20:03:22 -05'00'

Dr.-Ing. Christopher Varela

PROFESOR TUTOR



Mgtr. Christian Macías

PROFESOR COTUTOR

RESUMEN

El no tener un buen manejo del agua es un problema para muchos laboratorios, lo cual tiene repercusiones legales y perjudiciales al medio ambiente por la contaminación producida. El tratamiento de aguas residuales permite eliminar los contaminantes presentes en los efluentes, dándole un mayor aprovechamiento al agua. Por lo que, el proyecto tiene la finalidad de diseñar un sistema de tratamiento de aguas para la remoción de cloruros y sólidos totales presentes en un laboratorio de análisis químico, por medio de operaciones fisicoquímicas, logrando evitar las consecuencias legales y la contaminación de los efluentes. Primero, se realizó un diseño experimental a escala de laboratorio para determinar las condiciones óptimas del tratamiento. Para la eliminación de los sólidos totales se optó por un sistema de floculación y coagulación; y para los cloruros, una columna de intercambio iónico. Se empleó la poliacrilamida como floculante en una concentración de 200 ppm y el policloruro de aluminio como coagulante a 500 ppm; y, como indicadores de contaminación se midió la dureza, la concentración de SST y la turbidez, obteniendo una remoción mayor al 80%. En el caso del intercambio iónico se empleó una resina aniónica donde se obtuvo la relación de altura-diámetro y los parámetros de diseño. El pH y la conductividad fueron variables medibles con las que se obtuvo un porcentaje de remoción mayor al 80%. En base a los resultados experimentales y al caudal de diseño se realizó el dimensionamiento de los procesos planteados, con un costo capital de inversión de \$2702.00.

Palabras Clave: Aguas residuales, Coagulación, Diseño, Floculación, Intercambio iónico.

ABSTRACT

The lack of good water management is a problem for many laboratories, which has legal and environmental repercussions due to the contamination produced. The treatment of wastewater allows eliminating the pollutants present in the effluents, giving a better use to the water. Therefore, the purpose of the project is to design a water treatment system for the removal of chlorides and total solids present in a chemical analysis laboratory, by means of physicochemical operations, avoiding the legal consequences and the contamination of the effluents. First, an experimental design was carried out at laboratory scale to determine the optimum treatment conditions. A flocculation and coagulation system were chosen for the elimination of total solids, and an ion exchange column for chlorides. Polyacrylamide was used as flocculant at a concentration of 200 ppm and aluminum polychloride as coagulant at 500 ppm; and hardness, TSS concentration and turbidity were measured as contamination indicators, obtaining a removal of more than 80%. In the case of ion exchange, an anionic resin was used to obtain the height-diameter ratio and the design parameters. The pH and conductivity were measurable variables with which a removal percentage greater than 80% was obtained. Based on the experimental results and the design flow rate, the dimensioning of the proposed processes was carried out, with a capital investment cost of \$2702.00.

Key words: *Wastewater, Coagulation, Design, Flocculation, Ion exchange.*

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	1
ABSTRACT	2
ÍNDICE GENERAL	3
ABREVIATURAS.....	5
SIMBOLOGÍA.....	6
ÍNDICE DE TABLAS	7
ÍNDICE DE GRÁFICAS.....	9
CAPÍTULO 1	10
1. Introducción.....	10
1.1 Descripción del problema	10
1.2 Justificación del problema	11
1.3 Objetivos.....	13
1.3.1 Objetivo General.....	13
1.3.2 Objetivos Específicos	13
1.4 Marco teórico.....	13
1.4.1 Aguas residuales	13
1.4.2 Aguas residuales industriales.....	13
1.4.3 Características de las aguas residuales.....	14
1.4.4 Legislación Ambiental.....	15
1.4.5 Tratamiento de las aguas residuales	17
1.4.6 Tratamientos fisicoquímicos	19
CAPÍTULO 2	21
2. Metodología.....	21
2.1 Modalidad de la investigación	21
2.2 Población y muestra	21
2.3 Medición de caudal.....	21
2.4 Muestreo de aguas residuales	23
2.5 Caracterización de aguas residuales	23
2.6 Parte experimental de la planta de tratamiento de aguas residuales.....	27

2.6.1	Prueba de jarras	27
2.6.2	Sistema de Intercambio iónico	33
CAPÍTULO 3		37
3.	Resultados y análisis.....	37
3.1	Caudal experimental.....	37
3.2	Caracterización Inicial.....	38
3.3	Diagrama de Bloques del Proceso	39
3.4	Resultados de pruebas experimentales	39
3.4.1	Resultados de la prueba de jarras	39
3.4.2	Resultados de la columna de intercambio iónico	49
3.5	Diagrama de flujo del proceso	54
3.6	Diseño de las operaciones unitarias.....	55
3.6.1	Dimensionamiento del tanque de almacenamiento	55
3.6.2	Dimensionamiento de la trampa de grasas	57
3.6.3	Dimensionamiento del tanque de coagulación y floculación.....	62
3.6.4	Dimensionamiento de columna de intercambio iónico	69
3.7	Análisis de resultados.....	73
3.8	Análisis económico.....	78
3.8.1	Análisis de costos de los reactivos.....	78
3.8.2	Análisis de costo capital de inversión.....	80
3.8.3	Análisis del costo anual de operación de la planta	81
CAPÍTULO 4		82
4.	Conclusiones y recomendaciones	82
4.1	Conclusiones	82
4.2	Recomendaciones	85
Bibliografía		87
APÉNDICE		91

ABREVIATURAS

SST	Sólidos Suspendidos Totales
SD	Sólidos Disueltos
ST	Sólidos Totales
NTU	Nephelometric Turbidity Unit

SIMBOLOGÍA

kg	Kilogramo
mg	Miligramo
m	Metro
cm	Centímetro
h	Hora
min	Minutos
s	Segundos
L	Litro
mL	Mililitro
°C	Grado Centígrado
pH	Potencial de Hidrógeno
μS/cm	Microsiemens por centímetro
eq	Equivalente
meq/L	Miliequivalentes por litro
ppm	Partes por millón
rpm	Revoluciones por minuto
HP	Caballo de fuerza
M	Molaridad
N	Normal
Cl ⁻	Cloruros
CaCO ₃	Carbonato de Calcio
EDTA	Etilendiaminotetraacético

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros físicos de los efluentes	14
Tabla 2. Parámetros químicos de los efluentes	15
Tabla 3. Límites de descarga al sistema de alcantarillado	16
Tabla 4. Secuencia del tratamiento de aguas residuales	18
Tabla 5. Criterios de selección de los tipos de tratamientos	18
Tabla 6. Mediciones del caudal para el laboratorio ambiental	22
Tabla 7. Técnicas para la caracterización de aguas residuales	23
Tabla 8. Análisis preliminar de los efluentes	25
Tabla 9. Dosificación del volumen de la alícuota inicial de las disoluciones al 1%.....	30
Tabla 10. Combinaciones del diseño experimental Coagulación - Floculación	30
Tabla 11. Propiedades y características de la resina LEWATIT A 365	33
Tabla 12 Características de la Regeneración de la Resina	36
Tabla 13. Resultados del caudal experimental	37
Tabla 14. Resultado del caudal promedio experimental	38
Tabla 15. Análisis preliminar de efluentes	38
Tabla 16. Resultados de los parámetros de control antes de la prueba de jarras	40
Tabla 17. Volumen consumido de EDTA (mL).....	40
Tabla 18. Peso del papel filtro antes de la prueba (g)	41
Tabla 19. Peso del papel filtro después de la prueba (g).....	41
Tabla 20. Resultados de los variables después de las pruebas de jarras (Ensayo 1)..	42
Tabla 21. Resultados de los variables después de las pruebas de jarras (Ensayo 2)..	43
Tabla 22. Resultados de los variables después de las pruebas de jarras (Ensayo 3)..	43
Tabla 23. Resultados del porcentaje de remoción (Ensayo 1)	44
Tabla 24. Resultados del porcentaje de remoción (Ensayo 2)	44
Tabla 25. Resultados del porcentaje de remoción (Ensayo 3)	45
Tabla 26. Resultados promedios de los porcentajes de remoción	46
Tabla 27. Resultados de la validación del método de coagulación y floculación.....	49
Tabla 28. Concentración de Cloruros	49
Tabla 29. Resultados de parámetros: Conductividad y pH	50

Tabla 30. Resultados promedio de parámetros: Conductividad y pH	51
Tabla 31. Condiciones de diseño para el tanque de almacenamiento	55
Tabla 32. Dimensiones del tanque de almacenamiento	57
Tabla 33. Caudal y tiempo de retención hidráulica para trampas de grasas	58
Tabla 34. Condiciones de diseño para la trampa de grasas	59
Tabla 35. Dimensiones de la trampa de grasas.....	60
Tabla 36. Dimensiones de la trampa de grasas.....	62
Tabla 37. Condiciones de diseño para el tanque de coagulación y floculación.....	63
Tabla 38. Dimensiones del tanque de coagulación y floculación.....	65
Tabla 39. Dimensiones del sistema de agitación	66
Tabla 40. Principio de diseño para el grado de agitación	68
Tabla 41. Resultado de la potencia del coagulante y floculante	69
Tabla 42. Características de diseño de la resina Lewatit A 365	70
Tabla 43. Variables de diseño de la columna del intercambio iónico	70
Tabla 44. Resultados del diseño de la columna de intercambio iónico	73
Tabla 45 Costos de materia prima del sistema de tratamiento	78
Tabla 46 Costos de operación del sistema de tratamiento de aguas	79
Tabla 47. Estimación del costo de capital de inversión	80
Tabla 48. Costo total anual del sistema de tratamiento	81

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Figura 1. Desarrollo gradual del caudal experimental de efluentes	37
Figura 2. Esquematación del Diagrama de Bloques del proceso.....	39
Figura 3. Sólidos suspendidos totales en función de la concentración del floculante ..	36
Figura 4. Dureza total en función de la concentración del floculante.....	47
Figura 5. Turbidez en función de la concentración del floculante	48
Figura 6. Conductividad inicial vs. Número de ensayos	51
Figura 7. Conductividad final vs. Número de ensayos.....	52
Figura 8. Porcentaje de Remoción de cloruros vs. Número de ensayos	52
Figura 9. Porcentaje promedio de remoción de cloruros	53
Figura 10. Variación del pH en las muestras	53
Figura 11. Esquematación del diagrama de flujo del proceso.....	54
Figura 12. Esquema estándar del tanque almacenamiento.....	55
Figura 13. Esquema de la trampa de grasas	58
Figura 14. Esquema del tanque de coagulación y floculación con agitación.....	63
Figura 15. Esquema de columna de intercambio iónico	65
Figura 16. Relación del costo mensual de materia prima	79

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Descripción del problema

En muchos países de Latinoamérica, gran parte de los laboratorios químicos desconocen cómo desechar sus aguas residuales sin causar algún perjuicio a los recursos hídricos. Debido a esta situación, muchos laboratorios los almacenan, ya que no tienen información sobre cómo tratarlos o desecharlos correctamente; y en otros casos, simplemente los drenan directamente para el alcantarillado público.

En el Foro de Desarrollo Sostenible realizado por CEPAL de Naciones Unidas en el año 2019, se muestra que Ecuador posee un 43.35% de aguas residuales tratadas de manera correcta (Naciones Unidas CEPAL, 2019). Un estudio realizado por la Agencia de Regulación y control del Agua (ARCA) en el mismo año, en la provincia del Guayas, declara que el 53.30% de las aguas utilizadas en riegos agrícolas no cumplen con los parámetros establecidos en la normativa de los criterios de calidad del agua. En el análisis realizado se refleja que los parámetros incumplidos son: pH, sólidos totales, aceites y grasas, coliformes fecales, detergentes, demanda bioquímica de oxígeno, demanda química de oxígeno, cloruros y turbidez (Toranzos, 2019).

Por otro lado, en Quito se establece que uno de los mayores problemas ambientales es la contaminación de sus ríos. La empresa de agua potable 'EPMAPS' menciona que el problema es que la cantidad de flujo de agua a tratar es demasiado grande; teniendo un flujo de 3400 litros por segundo y que apenas se tratan el 3.50% de esas aguas contaminadas. Las siete plantas de aguas residuales con las que cuenta no abastecen para el tratamiento (Machado, 2020).

La provincia del Pichincha cuenta con 317 laboratorios registrados en la ACCESS-2022 (Agencia de Aseguramiento de la Calidad de los Servicios de Salud y Medicina

Prepagada) tanto públicos como privados (Gobierno de la República del Ecuador, 2021). El centro de análisis de alimentos, suelos y ambientes en Quito desconoce qué hacer con los residuos de las pruebas realizadas; por lo que, muchas veces los almacenan para no echarlos directamente al alcantarillado público, evitando afectar al Municipio del Distrito Metropolitano de Quito con multas o penalidades por incumplimiento de normativas.

El tratamiento aguas residuales se vuelve para el laboratorio una idea rentable y de sumo interés; ya que, por ahora se limitan a no recibir algunas muestras o no utilizar ciertos químicos en la realización de sus análisis como medida de control de la contaminación. Un sistema de tratamiento de aguas para sus efluentes reduciría en gran porcentaje los tóxicos presentes y mejoraría su control de calidad ambiental y evitaría la contaminación de sus efluentes.

Existen ciertas restricciones a considerar que pueden limitar el diseño del sistema de tratamiento de aguas residuales, como la falta de interés de las industrias por tratar sus efluentes, la falta de un reglamento legal vigente, el desconocimiento de la calidad y mejora ambiental, el desconocimiento de tecnologías y tratamientos correctos y, por último, la capacidad de inversión por parte de la empresa.

1.2 Justificación del problema

En 1983, la División de estudios Industriales para el Desarrollo de las Naciones Unidas, redactó un documento que hace referencia a las prácticas para el uso del agua y el tratamiento de efluentes en la industria. Este documento menciona la preocupación mundial por la contaminación de este recurso. Ecuador es uno de los países que lleva a cabo un compromiso y responsabilidad social con las Normativas de Calidad Ambiental y de Desarrollo Sostenible, ya que pertenece a la carta de intención propuesta por las Naciones Unidas redactada en el año 1992 conocida como Agenda 21 (Naciones Unidas Ecuador, 2022).

Según la organización global ACCIONA, más del 80% de aguas residuales que se vierten en ríos o mares vienen de efluentes contaminados. Es indudable que el agua es un recurso elemental para el desarrollo y garantía de una buena calidad de vida para todos los seres vivos. Por lo que, el tener acceso a este recurso hídrico con un buen saneamiento y buenas condiciones es un asunto que se ha puesto en discusión y gestión desde el año 1990 (Acciona, 2020).

Debido a la necesidad e importancia de este recurso y a su vez, el querer evitar su escasez; se han ido desarrollando e innovando diversos métodos y tecnologías que ayudan a cuidar y preservar del agua, evitando el incremento de la contaminación. En Ecuador existen varias entidades que regulan y protegen este patrimonio nacional, como la Ley Orgánica de Recursos Hídricos y las normas ambientales de calidad y de descarga de efluentes al recurso agua, legisladas por el Ministerio de Ambiente.

El desconocimiento e incumplimiento de normas ambientales es un problema común en nuestro medio. Existe una falta de compromiso o responsabilidad corporativa de velar por la conservación del medio ambiente y sus recursos. Por lo que, proyectos orientados a las mejoras ambientales y de sostenibilidad proveen soluciones con información útil y soporte para el crecimiento sostenible tanto de las empresas como de la sociedad. Este proyecto se enfoca en el saneamiento y gestión de las aguas residuales para un laboratorio de análisis químicos, haciendo énfasis en que invertir eficientemente en tratamientos de saneamiento es decisivo para la mejora de la salud pública, el medio ambiente y la calidad de vida, a la vez de traer beneficios económicos en las empresas.

Para el cliente, el no contar con un sistema de tratamiento adecuado y no cumplir con los estándares de las normas ambientales de descargas de efluentes, se convierte en un problema. El centro da apertura y soporte para llevar a cabo el desarrollo del sistema de tratamiento de aguas residuales adecuado a sus necesidades. La importancia de este estudio es lograr que el sistema de tratamiento sea eficaz para que remueva los parámetros críticos presentes en los efluentes, ayudando al centro a no caer en malas

prácticas ambientales, brindándoles conocimiento de cómo tratar sus efluentes correctamente y evitando penalidades por incumplimientos legales.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Proponer un sistema de tratamiento fisicoquímico para la remoción de sólidos totales y cloruros cumpliendo con los límites máximos permisibles de descarga de efluentes al alcantarillado público para dichos parámetros críticos.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Determinar un tratamiento fisicoquímico para la remoción de los parámetros críticos: sólidos totales y cloruros, en base a los ensayos realizados.
- Dimensionar las operaciones unitarias establecidas en el diagrama de flujo del proceso, para la proyección del sistema a mayor escala.
- Realizar un análisis tecno-económico del sistema de tratamiento de aguas residuales para la estimación del costo de capital y operacional.

1.4 Marco teórico

1.4.1 Aguas residuales

Las aguas residuales son fluidos con impurezas, cuya calidad ha cambiado por la influencia de las actividades humanas. Generalmente, provienen de urbes, sectores industriales o centros de entretenimiento y se clasifican en: aguas residuales domésticas, municipales, negras y grises (Crini & Lichtfouse, 2019).

1.4.2 Aguas residuales industriales

Las aguas residuales industriales son los vertidos acuosos resultantes de las sustancias disueltas en el agua generados por diversos procesos industriales. Al ser

utilizada en procesos de producción, el agua contiene una gran variedad de contaminantes que deben ser eliminados a niveles admisibles antes de ser descargados. Los componentes más comunes que requieren tratamiento son: sólidos suspendidos totales, aceites y grasas, pH, metales pesados y químicos regularizados.

Así que, el propósito de tratar las aguas residuales industriales es eliminar los contaminantes de acuerdo con los límites de descarga pública. Para hacerlo se tiene que diseñar un método eficaz que comprenda cómo las sustancias se disuelven en el agua, y con ello, se podrán tomar acciones físicas o químicas que intervengan en el proceso (Cisneros, 2011). Para cumplir con la legislación vigente, se deben controlar los contaminantes tanto orgánicos como inorgánicos presentes en el agua empleada en la producción industrial (Leonhauser & Pawar, 2014).

1.4.3 Características de las aguas residuales

Las aguas residuales se caracterizan por medio de parámetros físicos, químicos y biológicos. Habitualmente requieren un tratamiento antes de ser vertidas, ya que perjudican directamente al sistema de alcantarillado (Muttamara, 1996).

1.4.3.1 Parámetros físicos

Para medir la calidad del agua, los efluentes poseen parámetros físicos importantes como:

Tabla 1. Parámetros físicos de los efluentes (Eriksson, 2002)

Parámetros	Descripción
Sólidos	Sólidos orgánicos: productos que proceden de animales o vegetación. Sólidos inorgánicos: proceden de materiales que no tienen la capacidad para descomponerse.
Temperatura	Depende de las condiciones climáticas a las que se encuentran las muestras, el rango está entre 10 a 30°C.
Olor	La reducción de la materia orgánica genera malos olores, posibilitando el depósito de bacterias aeróbicas.
Conductividad	Presencia de partículas disueltas, minerales y químicos.
Turbidez	Característica visual que detalla la transparencia o el estado nuboso de un fluido.

1.4.3.2 1.4.3.2 Parámetros químicos

La calidad del agua se mide de acuerdo con los siguientes parámetros:

Tabla 2. Parámetros químicos de los efluentes (Reddy, 1997)

Parámetros	Descripción
pH	Mide la basicidad o acidez del efluente, el rango con el que trabaja es de 5 a 9.
Aceites y grasa	Contienen materias de origen mineral, animal y vegetal; provenientes de restaurantes, zonas industriales y domicilios. Causantes de provocar los bloqueos en las alcantarillas.
Oxígeno disuelto	Proporción de oxígeno que hay en el fluido.
Metales	Poseen una densidad muy alta y a concentraciones altas son tóxicos.
Cloruros	Son sales que se producen al combinar los átomos de cloro con otros metales, generalmente se encuentran en descargas de aguas residuales y sus altas concentraciones pueden perjudicar las estructuras metálicas y el desarrollo de vegetación.

1.4.4 Legislación Ambiental

La preocupación por la salud con respecto a la contaminación por las aguas residuales industriales ha suscitado importantes iniciativas de control medioambiental. Con este fin, las entidades gubernamentales establecieron normas de cumplimiento para la descarga de aguas residuales industriales a los sistemas de alcantarillado público. Estas normativas se basan en las características de los contaminantes del agua y en la tecnología empleada para el tratamiento de los efluentes (World Water Assessment Programme, 2003).

De acuerdo con la Norma de Calidad Ambiental y de Descarga de Efluentes del Libro de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente, expedido por la Ley de Gestión Ambiental, se tienen los límites permisibles y prohibiciones para las descargas en masas de aguas o en sistemas de saneamiento y drenaje. La Tabla 3 del Registro Oficial N°387, menciona los parámetros de descarga de agua al sistema de alcantarillado, los cuales deben ser efectuados por las aguas residuales industriales (Tapia, 2015).

Tabla 3. Límites de descarga al sistema de alcantarillado (Tapia, 2015)

Parámetros	Representación	Límite máximo permisible [mg/l]
Aceites y grasas	Sust. solubles en hexano	70.0
Explosivas o inflamables	Sustancias	Cero
Alkil mercurio	-	No detectable
Aluminio	Al	5.0
Arsénico total	As	0.1
Cadmio	Cd	0.02
Cianuro total	CN ⁻	1.0
Cinc	Zn	10.0
Cloro Activo	Cl	0.5
Cloroformo	Extracto carbón cloroformo	0.1
Cloruros	Cl ⁻	10 meq/L
Cobalto total	Co	0.5
Cobre	Cu	1.0
Compuestos fenólicos	Expresado como fenol	0.2
Compuestos organoclorados	Organoclorados totales	0.05
Cromo Hexavalente	Cr ⁺⁶	0.5
Demanda Bioquímica de Oxígeno (5 días)	DBO ₅	250
Demanda Química de Oxígeno	DQO	500
Dicloroetileno	Dicloroetileno	1.0
Fósforo Total	P	15.0
Hidrocarburos Totales de Petróleo	TPH	20.0
Hierro total	Fe	25.0
Manganeso total	Mn	10.0
Mercurio (total)	Hg	0.01
Níquel	Ni	2.0
Nitrógeno Total Kjedahl	N	60.0
Organofosforados	Especies Totales	0.1
Plata	Ag	0.5
Plomo	Pb	0.5
Potencial de hidrógeno	pH	6-9

Selenio	Se	0.5
Sólidos Sedimentables	SD	20.0
Sólidos Suspendidos Totales	SST	220.0
Sólidos totales	ST	1600.0
Sulfatos	SO ₄ ⁻²	400.0
Sulfuros	S	1.0
Temperatura	°C	<40.0
Tensoactivos	Sustancias Activas al azul de metileno	2.0
Tetracloruro de carbono	Tetracloruro de carbono	1.0
Tricloroetileno	Tricloroetileno	1.0

1.4.5 Tratamiento de las aguas residuales

La depuración de aguas residuales radica en aplicar métodos químicos, físicos o biológicos para tratar las aguas, con el objetivo de que sus características fisicoquímicas se asemejen a las que tenía el fluido antes de cualquier participación humana y estén dentro de los límites permisibles de la Norma de Calidad Ambiental y de Descarga de Efluentes al alcantarillado público. En la actualidad, muchas empresas cuentan con sistemas de tratamientos de aguas residuales, pero no son iguales, ya que cada una se ajusta particularmente a sus propias necesidades.

Sin embargo, existen similitudes indispensables en el tratamiento, puesto que primero se separarán los sólidos disueltos del medio, luego se utilizarán técnicas fisicoquímicas para remover los sólidos en suspensión y, por último, por medio de tratamientos biológicos se degradarán los compuestos orgánicos disueltos (Vlyssides, 2005).

1.4.5.1 Secuencia de los tratamientos de depuración

Los niveles que se toman en cuenta para tratar las aguas residuales son:

Tabla 4. Secuencia del tratamiento de aguas residuales (Campos, 1996)

Tratamiento	Proceso	Propósito	Modelo
Pretratamiento	Procesos físicos	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Detención de sólidos flotantes ▪ Disminución de sólidos ▪ Separación de aceites y grasas ▪ Homogeneización de caudal 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Cribado ▪ Tamizado ▪ Desarenado ▪ Desengrasado ▪ Homogeneización
Tratamiento primario	Procesos físicos	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Disminución del DBO₅ en un 25% y de sólidos suspendidos en un 50-80%. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Floculación ▪ Sedimentación ▪ Coagulación
Tratamiento secundario	Procesos biológicos	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Reducción del DBO original en un 75-90% y los ST en un 95%. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Procesos anaeróbicos ▪ Procesos aeróbicos
Tratamiento terciario	Procesos químicos	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Separación de contaminantes orgánicos. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Eliminación de contaminantes degradables.
Desinfección	Procesos químicos	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Eliminación de agentes infecciosos. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Esterilización física y química.

1.4.5.2 Criterios de selección de los tratamientos de Depuración

Para la selección del mejor tratamiento de aguas residuales, se deben tener presentes los siguientes criterios:

- Origen de la contaminación de las aguas residuales.
- Porcentaje de reducción de los contaminantes que se desea alcanzar.

Tabla 5. Criterios de selección de los tipos de tratamientos (FUNIBER, 1997)

1	Características fisicoquímicas de las aguas residuales	Contaminantes	Variación en el caudal
2	Límites de descarga	Descarga al alcantarillado	Descarga a un cuerpo de agua
3	Tecnología libre	Entorno natural	Espacio
4	Funcionamiento del tratamiento	Evitar sanciones ambientales	Deterioro ambiental
5	Inversión	Contribución	Financiación

6	Explotación	Mantenimiento	Mano de obra
7	Complejidad	Personal técnico	Soporte técnico
8	Flexibilidad	Proceso de producción	Cambio de la Normativa
9	Compatibilidad	Legislación laboral	Instalaciones aptas
10	Restitución del agua	Costo subsiguiente al tratamiento	Disponibilidad del fluido

1.4.6 Tratamientos fisicoquímicos

Para tratamientos de aguas residuales industriales se aplican técnicas físicas y químicas, que tienen como finalidad la separación de los sólidos en suspensión que han sido liberados durante el pretratamiento (Manios & Stentiford, 2011).

En los sistemas de tratamiento de aguas residuales se utilizan procesos tanto fisicoquímicos como biológicos, los cuales dependerán de la caracterización de sus efluentes y los parámetros exigidos por la normativa empleada (Bustillo, 2015).

Las ventajas de solamente utilizar procesos de depuración fisicoquímicas son:

- Menor costo de producción, debido a la reducción del espacio físico para implementación de equipos.
- Menor tiempo de retención, por lo que la rapidez del tratamiento aumenta.
- Mayor efectividad con respecto a la desinfección final.
- Efecto mínimo de los olores asociados a sistemas biológicos (Aloui, 2009).

1.4.6.1 Floculación y coagulación

Los sistemas de tratamientos de aguas residuales requieren un proceso de decantación, para eliminar los sólidos suspendidos, pero esta operación necesita altos tiempos de retención y de superficies vastas, de manera que, para acelerar y optimizar el proceso se agregan coagulantes o químicos que mejoren la calidad del efluente (Flamminii, 2021).

Los factores que influyen directamente en los procesos de coagulación y floculación son:

- pH: limita al coagulante que se va a emplear, ya que se reduce la creación de flóculos.
- Velocidad en la que fue agregado el reactivo: cuando hay una coagulación adecuada aparecen los primeros flóculos en los primeros minutos mediante una agitación lenta.
- Temperatura: favorece el proceso de coagulación y floculación al incrementar la velocidad de reacción (Shammas, 2005).

1.4.6.2 Intercambio aniónico

El intercambio iónico es un proceso químico empleado para desmineralizar o ablandar el agua, en el que los iones indeseables que han sido diluidos en los efluentes se permutan con otros de carga semejante.

Para eliminar los contaminantes disueltos, se genera un intercambio de iones entre el efluente y una resina, así que, el compuesto no deseado será intercambiado por el requerido. Existen dos grupos de iones que dependen directamente de la carga de la resina. Para eliminar cloruros se emplea el proceso de intercambio aniónico, en el que los iones negativos de la superficie de la resina se intercambiarán con los iones cargados negativamente del efluente.

Un sistema para tratar las aguas residuales industriales es aplicar un filtro de intercambio de aniones, en el que el material de la resina se cargará negativamente para el intercambio iónico con el cloruro que tienen los efluentes, mediante un proceso de absorción en sus cristales (Miyata, 1983).

Las ventajas de aplicar los sistemas de intercambio aniónico son:

- Ahorro de costos de producción, ya que la vida útil de los equipos aumenta y disminuyen los ciclos de lavado.
- Prever riesgos en la salud.
- Aprovechamiento del agua tratada para recreación y riego (Hickner, 2013).

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

2.1 Modalidad de la investigación

Para el desarrollo del siguiente proyecto se abarcaron varias técnicas de investigación pertinentes al caso de estudio. Para tener un mejor criterio en la selección de tratamientos y el dimensionamiento de los equipos participantes en el diseño se recurre a la investigación amplia, a la búsqueda informativa de publicaciones, revistas, libros e investigaciones pasadas que aporten con fundamentación teórica y ayuden a tener un mejor enfoque. Por otro lado, se requirió del método experimental para el estudio del efecto de dos tratamientos fisicoquímicos en la disminución de la contaminación de dos parámetros críticos.

2.2 Población y muestra

Para el estudio del proyecto se tomó como población los efluentes del centro de análisis de muestras ambientales. Cada uno de los procesos del laboratorio que generan aguas residuales son los diferentes puntos muestrales para la caracterización, siendo así un muestreo de muestras no probabilísticas a conveniencia. Se obtuvieron 10 muestras de los diferentes departamentos para analizar su contaminación en base a la normativa de límites máximos permisibles de descarga de efluentes (Tabla 3).

2.3 Medición de caudal

Dentro del proceso de investigación que se está llevando a cabo, se recorrieron las instalaciones del laboratorio ambiental y se identificaron los puntos de muestreo de las aguas residuales y el proceso de descarga de las mismas al sistema de alcantarillado público.

Por medio de un estudio de campo se determinó el caudal diario, adicional a ello se identificó el horario de vertido de los efluentes. El centro de análisis comienza su jornada laboral de 7:00 am a 6:00 pm aproximadamente de lunes a viernes; por lo que, para una medición del caudal más exacta se empleó un método volumétrico, en el que se midió que

consiste en medir el volumen de todas las muestras simples que se vierten al desagüe por día, simulando datos provenientes de un tanque homogeneizador durante una jornada laboral. Para obtener mayor precisión se realizó el mismo procedimiento por 30 días, obteniéndose los datos de la Tabla 6.

Tabla 6. Mediciones del caudal para el laboratorio ambiental

Fecha	Volumen [L]	Tiempo [h]	Fecha	Volumen [L]	Tiempo [h]
25/04/2022	502	10.5	16/05/2022	502	11.3
26/04/2022	495	11.0	17/05/2022	520	11.0
27/04/2022	510	11.3	18/05/2022	509	11.1
28/04/2022	505	11.0	19/05/2022	500	11.0
29/04/2022	490	10.8	20/05/2022	497	10.9
02/05/2022	489	10.9	23/05/2022	498	10.8
03/05/2022	457	10.8	24/05/2022	492	10.9
04/05/2022	497	11.0	25/05/2022	490	11.0
05/05/2022	495	10.7	26/05/2022	500	10.9
06/05/2022	498	10.9	27/05/2022	498	10.8
09/05/2022	506	11.0	30/05/2022	502	11.1
10/05/2022	500	10.6	31/05/2022	510	10.9
11/05/2022	496	11.0	01/06/2022	490	11.1
12/05/2022	513	11.1	02/06/2022	506	11.2
13/05/2022	520	10.9	03/06/2022	513	10.8

La determinación del caudal es una variable muy importante para el diseño de la planta de tratamiento de aguas residuales, puesto que delimita sus dimensiones. Con los datos obtenidos en la Tabla 6, se utilizó la ecuación 2.1 para obtener el caudal experimental del sistema.

$$Q = \frac{V}{t} \quad (2.1)$$

Donde:

Q = Caudal del diseño experimental.

V = Volumen de los efluentes diarios.

t = Tiempo de trabajo por día.

2.4 Muestreo de aguas residuales

Para la toma de muestras de aguas residuales procedentes de los distintos puntos del laboratorio ambiental, se empleó la Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2169:98, que establece las medidas que se deben tomar para mantener y trasladar los efluentes (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 1998). La recolección de los efluentes se efectuó en bidones de 20 litros correctamente sellados para impedir que la muestras se pierdan y contaminen durante su transporte.

Para el diseño experimental se llenaban los bidones con los efluentes que iban a ser desechados durante la jornada laboral en las distintas áreas del centro de análisis ambiental. Para ello, las muestras fueron conservadas en una cámara frigorífica del laboratorio a 5°C, ya que la naturaleza de las aguas residuales lo requiere para realizar el análisis adecuado.

2.5 Caracterización de aguas residuales

La caracterización de las aguas residuales del laboratorio se llevó a cabo en el centro de análisis de muestras en Quito, donde se realizaron análisis fisicoquímicos y microbiológicos para la determinación de los parámetros contaminantes. Se utilizó el método estándar establecido bajo la Norma NTE INEN ISO/IEC 17025:2008 para cada ensayo.

Tabla 7. Técnicas para la caracterización de aguas residuales (SAE, 2018)

Ensayo	Técnica	Método de Referencia
pH	Electrometría (4 - 12) unidades pH	PEE-ANNCY-48 Standard Methods, Ed. 23. 2017 4500 H+ B
Temperatura	Termometría (8 – 40) °C	PEE-ANNCY-81 Standard Methods, Ed. 23. 2017 2550 B
Oxígeno Disuelto	Electrometría (1 – 9) mg/L	PEE-ANNCY-07 Standard Methods, Ed. 23. 2017 4500-O-G

Conductividad	Electrometría (3.0 a 10000) μ S/cm	PEE-ANNCY-18 Standard Methods, Ed. 23. 2017 2510 B
Aceites y grasas	Espectrofotometría IR (0.20 – 5000) mg/L	PEE-ANNCY-01/44 Standard Methods, Ed. 23. 2017 5520 C/5520 F
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	Espectrofotometría UV – Vis (30 – 6000) mg/L	PEE-ANNCY-03 Standard Methods, Ed. 23. 2017 5220 D
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	Respirometría (3 – 2800) mg/L	PEE-ANNCY-23 Standard Methods, Ed. 23. 2017 5210 D
Color	Espectrofotometría UV – Vis (10 – 500) Pt-Co	PEE-ANNCY-115 Standard Methods, Ed. 23. 2017 2120 C, HACH 8025
Tensoactivos	Espectrofotometría UV – Vis (0.25 – 100) mg/L	PEE-ANNCY-71 Standard Methods, Ed. 23. 2017 5540 C
Fenoles	Espectrofotometría UV – Vis (0.025 – 2) mg/L	PEE-ANNCY-70 Standard Methods, Ed. 23. 2017 5530 C
Nitrógeno total Kjeldahl	Espectrofotometría UV – Vis (24 – 450) mg/L	PEE-ANNCY-56 Standard Methods, Ed. 23. 2017 HACH 8075
Cloruros	Volumetría (5 – 20000) mg/L	PEE-ANNCY-49 Standard Methods, Ed. 23. 2017 4500 Cl ⁻ C
Sólidos totales	Gravimetría (100 – 42000) mg/L	PEE-ANNCY-11 Standard Methods, Ed. 23. 2017 2540 B
Sólidos sedimentables	Volumetría (5 – 100) mg/L	PEE-ANNCY-26 Standard Methods, Ed. 23. 2017 2540 F
Sólidos disueltos totales	Gravimetría (250 – 8000) mg/L	PEE-ANNCY-100 Standard Methods, Ed. 23. 2017 2540 C

Sólidos suspendidos totales	Gravimetría (50 – 2000) mg/L	PEE-ANNCY-99 Standard Methods, Ed. 23. 2017 2540 D
Metales	Espectrometría óptica de plasma (ICP-OES)	PEE-ANNCY-74 Standard Methods, Ed. 23. 2017 3120 B, 3030 B/D/E
Dureza total	Volumetría (5 – 1000) mg/L	PEE-ANNCY-50 Standard Methods, Ed. 23. 2017 2340 C
Coliformes fecales	Número más probable NMP>1.0 NMP/100 mL	PEE-ANNCY-76 Standard Methods, Ed. 23. 2017 9223 B
Coliformes totales	Número más probable NMP>1.0 NMP/100 mL	PEE-ANNCY-76 Standard Methods, Ed. 23. 2017 9223 B

Las aguas residuales fueron tomadas del muestreo realizado experimentalmente por 30 días. En una botella de plástico de 3 litros se colocaron 30 alícuotas aleatorias de 100 mL de los efluentes provenientes de los diferentes bidones que se habían llenado previamente para la determinación del caudal. Del mismo modo, se repitió el mismo procedimiento hasta llenar 10 botellas de plástico de 3 litros cada una.

A partir de las muestras compuestas, se realizaron 10 ensayos empleando las técnicas de caracterización mostradas en la Tabla 7, donde se obtuvieron los siguientes valores de contaminación presentes en los efluentes (Tabla 8).

Tabla 8. Análisis preliminar de los efluentes

Parámetros	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Ensayo 4	Ensayo 5
pH	7.30	7.56	6.97	8.40	7.24
Sólidos totales (mg/L)	2990	3209	3006	3160	3276
Sólidos sedimentables (mg/L)	45	50	55	56	61

Sólidos suspendidos totales (mg/L)	235	194	200	285	268
Aceites y grasas (mg/L)	85	44	35	39	57
Coliformes fecales (NMP/100mL)	525	340	1205	1450	1210
Tensoactivos (mg/L)	0.25	0.34	0.50	0.45	0.65
DBO ₅ (mg/L)	150	600	400	350	150
DQO (mg/L)	230	310	1500	250	450
Cloruros (meq/L)	28	21	19	28	18
Nitrógeno total (mg/L)	33	20	10	0	12
Fenoles (mg/L)	0	0	0.10	0	0
Parámetros	Ensayo 6	Ensayo 7	Ensayo 8	Ensayo 9	Ensayo 10
pH	8.60	8.51	7.68	8.12	6.92
Sólidos totales (mg/L)	3108	2993	3189	3014	2998
Sólidos sedimentables (mg/L)	59	65	50	54	60
Sólidos suspendidos totales (mg/L)	295	252	300	204	275
Aceites y grasas (mg/L)	32	0	12	56	40
Coliformes fecales (NMP/100mL)	1010	1130	900	650	450
Tensoactivos (mg/L)	0.89	0.15	0	0.34	1.19
DBO ₅ (mg/L)	550	220	310	290	500
DQO (mg/L)	750	550	2000	280	2115
Cloruros (meq/L)	13	23	19	16	29

Nitrógeno total (mg/L)	21	14	17	12	23
Fenoles (mg/L)	0.05	0.01	0	0	0.03

2.6 Parte experimental de la planta de tratamiento de aguas residuales

El sistema de tratamientos que se empleó para los efluentes del laboratorio fue basado en la caracterización preliminar del agua residual (Tabla 8), definiendo distintas operaciones unitarias basadas en procesos fisicoquímicos. Para el desarrollo de la experimentación, se simularon todas las operaciones del sistema de tratamiento de aguas a escala de laboratorio, empleando diferentes equipos y materiales que puedan representar cada operación unitaria e identificando las variables de cada sistema para la optimización del diseño.

2.6.1 Prueba de jarras

En el laboratorio de análisis ambientales se realizaron tres pruebas de tratabilidad para establecer los parámetros de diseño del sistema de tratamiento de aguas y la dosificación necesaria de los coagulantes y floculantes. Para ello, se llevaron a cabo pruebas de jarras para simular las etapas del proceso fisicoquímico. Primero se determinó la dureza total, turbidez y los sólidos suspendidos totales presentes en las aguas residuales para que al finalizar el procedimiento se pueda verificar la efectividad del método.

Se utilizó un turbidímetro previamente calibrado para medir la turbidez del efluente, en la celda se colocó el agua residual y se secó con papel seda para evitar interferencias en la operación, luego se introdujo la muestra en el turbidímetro para obtener el resultado. Para la dureza total se empleó el método volumétrico de EDTA, en el que se colocó 50 mL de muestra de agua residual en un vaso de precipitación, se midió su pH y se lo ajustó a 10 empleando una solución Buffer, luego se colocaron tres gotas de NET (Negro de Eriocromo T) y se prosiguió a titular con EDTA a una concentración de 0.01 M hasta que cambió de color, el valor que se obtuvo del volumen consumido es el que se tiene que registrar para los cálculos y junto con la ecuación 2.2 se determinó la dureza total de la muestra.

$$DT = \frac{V_{EDTA} * C_{EDTA}}{V_{muestra}} \quad (2.2)$$

Donde,

DT = Dureza total (ppm CaCO₃).

V_{EDTA} = Volumen de EDTA consumido (mL).

C_{EDTA} = Concentración del EDTA empleado (M).

V_{muestra} = Volumen de la muestra de efluente utilizado (mL).

Por último, para los sólidos suspendidos totales se empleó el método gravimétrico, en el que se utilizó un papel filtro previamente secado en una estufa, se lo pesó y se realizó una filtración al vacío de la muestra de agua residual, al finalizar se colocó el papel filtro en una estufa para eliminar el exceso de agua y una vez seco, se procedió a pesar, obteniendo que la cantidad de sólidos suspendidos totales en el agua residual, es la diferencia entre el peso inicial y final del papel filtro (Ecuación 2.3).

$$SST = \frac{m_{filtrofinal} - m_{filtroinicial}}{V_{muestra}} \quad (2.3)$$

Donde,

SST = Sólidos suspendidos totales (ppm).

m_{filtrofinal} = Peso del papel filtro después de la filtración al vacío (mg).

m_{filtroinicial} = Peso del papel filtro antes de la filtración al vacío (mg).

V_{muestra} = Volumen de la muestra de efluente utilizado (L).

Además, se procedió a medir el pH de las muestras, ya que es un factor crítico en el proceso de coagulación y floculación. Una variación de este parámetro disminuye la estabilidad de la dispersión coloidal, ya que condiciona al coagulante que se va a emplear, variando la dosificación y limitando la creación de flóculos. Para determinar el pH, se utilizó un pH-metro previamente calibrado, primero se lavó el electrodo con agua destilada para evitar cualquier tipo de contaminación o error en el resultado, luego se sumergió la sonda

de pH en el vaso de precipitación en el que se encontraban las muestras de aguas residuales, obteniendo los resultados una vez que el medidor haya reconocido la solución.

De preferencia, el rango óptimo de pH para muestras de aguas residuales tiene que estar en la región paralela de la solubilidad de los átomos del coagulante empleado. La ventaja de utilizar polímeros en el proceso es que trabajan con un rango amplio de 6 a 10. Caso contrario, si la muestra se encuentra fuera de rango, se tiene que agregar hidróxido de sodio o ácido sulfúrico 1 N, dependiendo del pH en el que se encuentre. Para ello, se agregan lentamente gotas en las muestras y agitando manualmente se verifica en el pHmetro como va variando la solución.

Como se tomó una de las muestras compuestas obtenidas durante los ensayos para la caracterización inicial de las aguas residuales, con ayuda de dos probetas de 1000 mL se vertió su contenido en cinco vasos de precipitación de 250 mL. En un matraz volumétrico de 100 mL se preparó una solución de policloruro de aluminio al 1%, en el que se añadió un gramo de coagulante por cada 100 mL de agua destilada. A su vez, en otro matraz volumétrico de 100 mL se realizó el mismo procedimiento para preparar la solución al 1% de poliacrilamida, empleando 1 g de floculante por cada 100 mL de agua desionizada.

Como se preparó una solución al 1% de coagulante y floculante, la concentración inicial de ambos fue de 10000 ppm. Por lo que, se empleó la ecuación 2.4 para determinar el volumen de la alícuota inicial de disolución al 1% que se debe verter en cada uno de los vasos de precipitación de 250 mL variando la concentración de la solución resultante en un rango de 50 a 500 ppm.

$$C_1 * V_1 = C_2 * V_2 \quad (2.4)$$

Donde,

C_1 = Concentración de la solución inicial.

C_2 = Concentración de la solución resultante.

V_1 = Volumen de la alícuota inicial.

V_2 = Volumen de la solución resultante.

Tabla 9. Dosificación del volumen de la alícuota inicial de las disoluciones al 1%

V ₁ (mL)	C ₁ (ppm)	V ₂ (mL)	C ₂ (ppm)
1.25	10000	250	50
2.50			100
5.00			200
8.75			350
12.50			500

Como variables independientes en el diseño experimental de coagulación y floculación se obtiene la concentración del coagulante y del floculante, por lo que se hicieron distintas combinaciones con respecto a las dosificaciones que se iban a emplear en los ensayos. Como se puede ver en la Tabla 10, se realizaron 25 ensayos diferentes. Para el primer grupo, se colocaron los cinco vasos de precipitación de 250 mL con aguas residuales en la plancha de agitación y en el interior de cada uno de ellos un agitador magnético.

Se rotuló y se añadió rápidamente con una pipeta de 10 mL, las diferentes concentraciones de coagulantes (50, 100, 200, 350 y 500) ppm y como se puede observar en la Tabla 9, los 50 ppm equivalen a 1.25 mL de solución al 1% de policloruro de aluminio, 100 ppm a 2.50 mL, 200 ppm a 5 mL, 350 ppm a 8.75 mL y 500 ppm a 12.50 mL. Luego, se encendió el equipo a una velocidad de giro de 100 rpm por un minuto para lograr un mejor proceso de mezclado. Al finalizar la agitación se agregó rápidamente con otra pipeta de 10 mL, 50 ppm de floculante, es decir, 1.25 mL de poliacrilamida al 1%. De la misma manera, se volvió a encender el equipo con una agitación constante de 100 rpm por un minuto.

Tabla 10. Combinaciones del diseño experimental Coagulación - Floculación

	Floculante					
	Concentración [ppm]	50	100	200	350	500
Coagulante	50	x	x	x	x	x
	100	x	x	x	x	x
	200	x	x	x	x	x
	350	x	x	x	x	x
	500	x	x	x	x	x

Luego del minuto, se disminuyó la velocidad de giro a 50 rpm, dejando agitar las muestras por 25 minutos. Al parar la agitación, se retiraron los agitadores magnéticos, y se dejó reposar la muestra para su sedimentación. En cada uno de los sistemas, se midió el tiempo que tardaron los primeros flóculos en formarse para determinar la combinación más adecuada. Después de 30 minutos, evitando la remoción de sólidos sedimentados, se tomó una alícuota de cada uno de los sistemas para analizar los parámetros de interés (turbidez, dureza total y sólidos suspendidos), con el propósito de hallar la dosificación adecuada de floculante y coagulante, acorde a los porcentajes de reducción (Ecuación 2.5).

$$\%R_x = \frac{(x_i - x_f)}{x_i} * 100\% \quad (2.5)$$

Donde,

$\%R_x$ = Porcentaje de reducción.

X_i = Variable de interés inicial.

X_f = Variable de interés final.

Finalmente, se repitió el procedimiento cuatro veces más, con las 4 concentraciones de floculantes que quedaron (100, 200, 350, 500) ppm. Del mismo modo, de las muestras compuestas empleadas para los 10 ensayos de la caracterización inicial, se tomaron dos muestras más para realizar el mismo método y con los datos obtenidos se procedió a realizar la comparación correspondiente y elegir la mejor dosificación de coagulante y floculante para el diseño.

2.6.1.1 Coagulante y floculante

Para las pruebas de jarras se utilizó policloruro de aluminio al 1% como coagulante, ya que, de acuerdo con la literatura, las sales de aluminio son las más económicas y de mayor difusión. Además, las ventajas que presenta este polímero en comparación al sulfato de aluminio, es que por lo general no necesitan un mayor ajuste de pH, no generan tantos lodos, se requiere un menor consumo del coagulante, reacciona fácilmente y se disuelve en cualquier tipo de agua residual.

Para la experimentación, se empleó como floculante la poliacrilamida al 1%, la cual trabaja perfectamente con el coagulante, ya que al ser un polímero no iónico forma puentes entre los polímeros. Además, como ventajas presenta un incremento en la retención de fluidos, es ideal para separar sólidos disueltos en aguas residuales, tiene un mayor porcentaje de remoción de la turbidez del efluente, ya que posee una atracción con las impurezas y puede flocular metales pesados que se encuentren en el sistema (Aguilar & Sáez, 2002).

2.6.1.2 Validación de la dosificación del coagulante y floculante

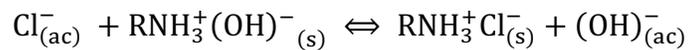
Una vez que se determinó la dosificación adecuada de coagulante y floculante para los tres sistemas de ensayo, se realizó una validación del método, ya que, si los resultados obtenidos se encuentran próximos al índice de referencia verdadero de la muestra, se demostrará que el procedimiento es idóneo para la función manifestada. Por lo que, se utilizaron las siete muestras restantes que quedaron de la caracterización inicial para validar las concentraciones obtenidas en las pruebas de jarras.

Se colocaron las distintas muestras de aguas residuales en siete vasos de precipitados de 250 mL, luego se colocaron los envases en la plancha de agitación con un agitador magnético en su interior. Con una pipeta se colocó rápidamente la dosificación establecida de coagulante, ya que al querer que los coloides se neutralicen se requiere que el reactivo empleado se adicione al fluido en el menor tiempo posible. Del mismo modo, se encendió el equipo y con la misma velocidad de giro establecida, 100 rpm, se mezcló la muestra por un minuto.

Al terminar la agitación se agregó la dosificación propuesta de floculante y se volvió a encender el equipo a 100 rpm por un minuto. Luego, se disminuyó la velocidad de giro a 50 rpm y se dejó agitar la muestra por 25 minutos. Al parar el movimiento, se dejaron las muestras sedimentar por 30 minutos, midiendo el tiempo desde que aparecieron los primeros flóculos en las aguas. Después de ese periodo, se determinó el porcentaje de remoción de los sólidos suspendidos totales y turbidez del agua, con el objetivo de validar la dosificación expresada.

2.6.2 Sistema de Intercambio iónico

Esta operación unitaria se empleó para la remoción de cloruros disueltos en el agua residual, su fundamento se basa en una transferencia de masa en fase líquida con adsorbente sólido, que en este caso es la resina. El intercambio iónico aprovecha la capacidad de intercambio útil de la resina para intercambiar su ion libre con los iones deseados. Este proceso es guiado por la siguiente reacción reversible:



Las propiedades y características de la resina empleada se detallan en la siguiente tabla.

Tabla 11. Propiedades y características de la resina LEWATIT A 365 (LenTech, 2012)

Descripción General	
Grupo funcional	Poliamina
Estructura	Macro porosa
Aspecto	Amarillo, blanco
Propiedades fisicoquímicas	
Retención de agua	43% - 54%
Variación de volumen	25%
Capacidad total	3.4 eq/L min
Tamaño de partícula	0.4 – 1.6 mm
Densidad	1.1 g/mL
Vida útil por volumen de agua tratada	70 – 300 m ³ /L de resina
Condiciones Operacionales	
Temperatura de operación máxima	60°C
Rango de pH de operación	0 - 8

El agua residual contiene una concentración de iones de cloruros disueltos que es importante conocer antes de iniciar el proceso. Se determinó la cantidad de resina necesaria para la remoción de los cloruros siguiendo las siguientes ecuaciones de diseños de diseño (Dardel, 2021).

Peso Equivalente:

$$PE = \frac{PM}{VA} \quad (2.6)$$

Miliequivalentes:

$$Meq = \frac{C \left(\frac{mg}{L} \right)}{PE \left[\left(\frac{mg}{mmol} \right) * \left(\frac{1mmol}{\#meq} \right) \right]} \quad (2.7)$$

Equivalentes de Cloruros:

$$EED = \frac{Meq}{1000} = \frac{eq}{L} \quad (2.8)$$

Volumen de resina requerido:

- Impurezas → EED [eq/L]
- Flujo de agua → G [m³/h]
- Capacidad de intercambio → CRC [eq/L]
- Ciclo de Regeneración → CR [h/ciclo]

$$\text{Volumen de Resina} \rightarrow VRC = \frac{(EED)(G)(CR)}{(CRC)} \quad (2.9)$$

Para la implementación del proceso a escala de laboratorio se realizó una cromatografía aniónica donde el analito de la muestra problema es el cloruro. Para el desarrollo de la práctica se requirió de diferentes equipos como una columna de vidrio de 5 cm de diámetro y 20.5 cm de altura, vasos de precipitación de diferentes volúmenes, matraces Erlenmeyer de 125 mL y como reactivos la resina de intercambio aniónico (Lewatit A 365), la muestra de agua residual y agua limpia. En este proceso se tuvo control de dos parámetros: el pH y la conductividad del agua; para poder estimar la eficiencia del proceso.

Primero, se obtuvo la cantidad de resina a emplear para el volumen de la columna y después se rellenó la columna de vidrio con la resina aniónica. Luego, se midió el pH y conductividad inicial de cada muestra; para la experimentación se tomaron las 3 muestras

que se utilizaron para coagulación y floculación en un volumen de 1000 mL. Se vertió 200 mL de la primera muestra en la columna de intercambio. Se abrió la llave de paso y se recogió la muestra final en un vaso de precipitado de 250 mL y se midió el pH y la conductividad final del agua. Este paso se repitió 5 veces hasta completar el litro de la muestra y se lo realizó para las 3 muestras.

2.6.2.1 Métodos de regeneración de columna de intercambio

Todo proceso de intercambio iónico consta de dos etapas: la etapa de agotamiento y la etapa de regeneración de la resina, donde la regeneración puede ser determinada de manera co-corriente y contracorriente; para el diseño se propone que la regeneración se lleve a cabo de forma contracorriente. Para la etapa de regeneración se debe considerar el ciclo donde la resina se regenera, el cual consta de 4 etapas, la primera es el agotamiento, la segunda es el esponjamiento, la tercera la regeneración y la cuarta el enjuague.

La etapa de saturación o agotamiento es donde la resina se va saturando poco a poco hasta llegar a un punto que no permita mayor retención de iones por lo que se pasa a la etapa donde se realiza el esponjamiento que es un contra lavado para eliminar partículas en suspensión y partículas acumuladas en la superficie de la resina. Para este diseño no es necesario realizar un esponjamiento por lo que opera con flujo inverso, por lo que, no se necesita contra lavar el lecho de antes de la regeneración; el arreglo de capas de la resina de la columna que no debe ser perturbado.

Para la regeneración de la resina aniónica en contra corriente se debe introducir el regenerante en solución acuosa con un caudal bajo para que el tiempo de contacto sea de aproximadamente 30 minutos de manera lenta y continua. Para este proceso, se empleó como regenerante el hidróxido de sodio. La literatura aconseja que la concentración sea de 50-60 kg de NaOH al 100% por cada m³ de resina aniónica. Además, menciona que el ingreso del regenerante de las resinas aniónicas debe ser pasado en un tiempo no menor de 30 minutos y que un porcentaje de 15% a 30% se debe desechar al inicio para evitar la formación de sílices. (Dardel, 2021) Finalmente, en la etapa del enjuague se realizan dos

enjuagues uno lento y uno rápido para eliminar los residuos del regenerante y que el agua alcance la calidad deseada.

Tabla 12. Características de la Regeneración de la Resina (LenTech, 2012)

Regeneración de NaOH	Concentración	2-5 % peso
Regeneración de NaOH	Temperatura	20 – 25 °C (ambiente)
Regeneración de NaOH	Cantidad contra corriente	100 g/L min
Tiempo de contacto de regeneración	Tiempo	30 min
Enjuague lento a caudal de regeneración	Caudal	2 min/L
Enjuague rápido a caudal de regeneración	Caudal	4 min/L

Es importante conocer la tasa de regeneración que será fijada en la resina durante su ciclo, su porcentaje de exceso y el rendimiento de la regeneración. Se determinaron todos estos parámetros empleando las siguientes ecuaciones:

$$\text{Tasa de regeneración} = \frac{\text{Cantidad de regenerante}}{\text{Carga ionica}} \left[\frac{\text{eq}}{\text{eq}} \right] \quad (2.10)$$

$$\% \text{Exceso} = 100 * (\text{tasa de regeneración} - 1) \quad (2.11)$$

$$\% \text{Rendimiento} = 100 \times \left(\frac{\text{carga ionica} \left[\frac{\text{eq}}{\text{eq}} \right]}{\text{regenerante} \left[\frac{\text{eq}}{\text{eq}} \right]} \right) \quad (2.12)$$

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Caudal experimental

En la tabla 13 se presentan los resultados experimentales del caudal por 30 días, obtenidos a partir de la ecuación 2.1 con las mediciones presentadas en la tabla 6.

Tabla 13. Resultados del caudal experimental

Dí	Caudal [L/min]	Día	Caudal [L/min]	Día	Caudal [L/min]
1	0.80	11	0.77	21	0.77
2	0.75	12	0.79	22	0.75
3	0.75	13	0.75	23	0.74
4	0.77	14	0.77	24	0.76
5	0.76	15	0.80	25	0.77
6	0.75	16	0.74	26	0.75
7	0.71	17	0.79	27	0.78
8	0.75	18	0.76	28	0.74
9	0.77	19	0.76	29	0.75
10	0.76	20	0.76	30	0.79

De la misma manera, para obtener una mejor apreciación de los resultados, se presenta la figura 1 en la que se observa la variación del caudal en un mes.

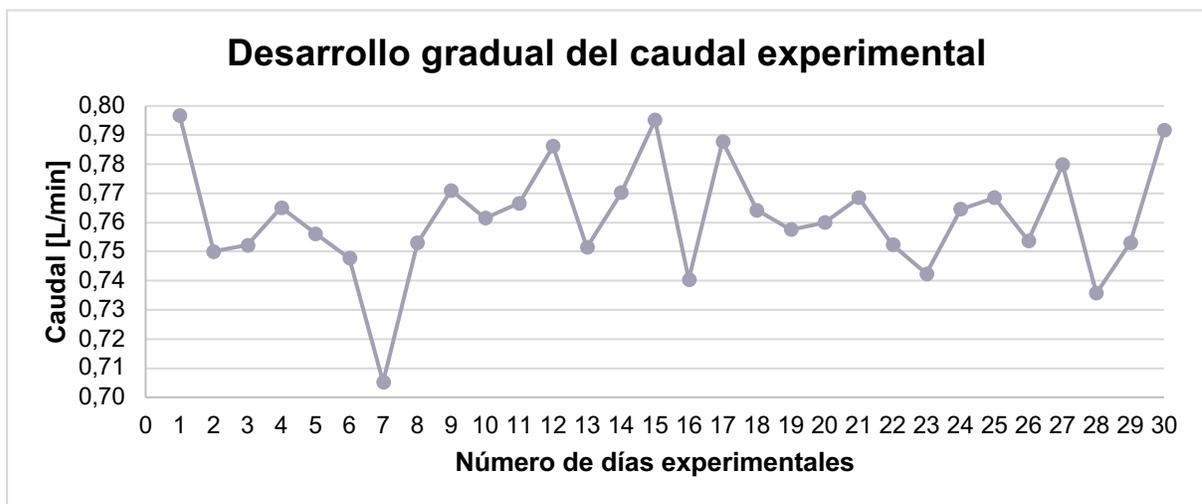


Figura 1. Desarrollo gradual del caudal experimental de efluentes

En la tabla 14 se presentan los resultados del caudal mínimo, máximo y promedio experimental, obtenidos de los valores presentados en la tabla 13. Se obtuvo un valor promedio de 0.76 L/min con una desviación estándar de 0.019 L/min, que sirve como referencia para estimar la variabilidad del procedimiento empleado. Por lo tanto, al ser un valor relativamente bajo, se puede utilizar el promedio del caudal para proyectar el diseño del sistema de tratamiento de aguas residuales.

Tabla 14. Resultado del caudal promedio experimental

Parámetros	Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación Estándar
Caudal [L/min]	0.71	0.80	0.76	0.019

3.2 Caracterización Inicial

Los resultados de la caracterización inicial de las muestras compuestas de aguas residuales se presentan en la tabla 15 con sus valores mínimos, máximos y promedios.

Tabla 15. Análisis preliminar de efluentes

Parámetros	Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación Estándar
pH	6.92	8.60	7.73	0.64
Sólidos totales (mg/L)	2990.00	3276.00	3094.30	107.65
Sólidos sedimentables (mg/L)	45.00	65.00	55.50	6.02
Sólidos suspendidos totales (mg/L)	194.00	300.00	250.80	40.38
Aceites y grasas (mg/L)	0.00	57.00	40.00	23.71
Coliformes fecales (NMP/100mL)	340.00	1450.00	887.00	376.26
Tensoactivos (mg/L)	0.00	1.19	0.48	0.35
DBO ₅ (mg/L)	150.00	600.00	352.00	159.71
DQO (mg/L)	230.00	2115.00	843.50	742.80
Cloruros (meq/L)	13.00	29.00	21.40	5.48
Nitrógeno total (mg/L)	0.00	23.00	14.30	9.72
Fenoles (mg/L)	0.00	0.10	0.02	0.03

3.3 Diagrama de Bloques del Proceso

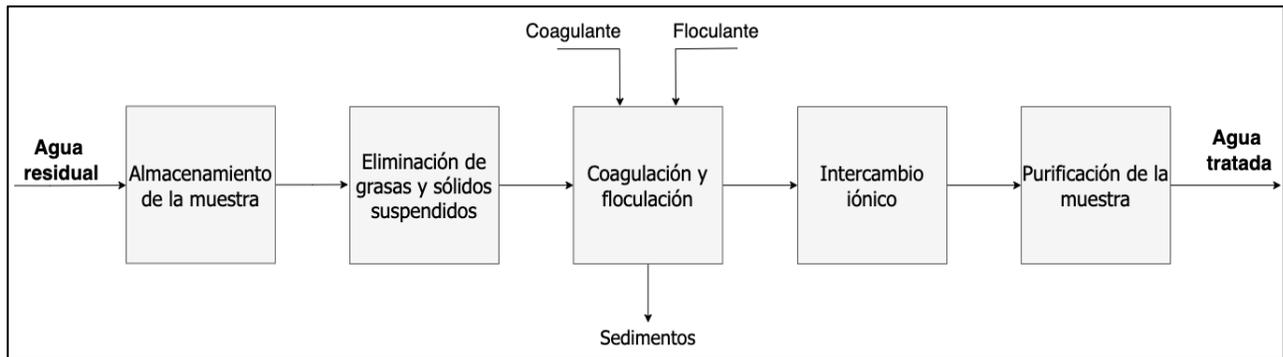


Figura 2. Esquematación del Diagrama de Bloques del proceso

La figura 2 representa el diagrama de bloques propuesto para diseñar el sistema de tratamiento de aguas residuales en el centro de análisis ambiental. En función a los resultados obtenidos en el caudal y la caracterización inicial de las muestras, se propone una etapa en la que durante una jornada laboral se almacene el efluente. Luego, el fluido pasará a un equipo que se encargue de eliminar las grasas y sólidos suspendidos presentes, lo cual es importante, ya que la presencia de estos puede afectar el funcionamiento de todo el sistema.

Posteriormente, para mejorar la calidad del agua y eliminar los sólidos totales, se propone un proceso de coagulación y floculación. Para ello, se realizarán pruebas experimentales para determinar la dosificación necesaria de coagulante y floculante. A continuación, se encuentra el intercambio iónico, técnica que permite eliminar los cloruros del agua, este procedimiento requiere que se realicen ensayos para obtener las condiciones necesarias de diseño para el dimensionamiento de los equipos. Por último, para descartar cualquier impureza que haya quedado en el sistema, se sugiere una etapa de purificación de la muestra y finalmente obtener el agua tratada.

3.4 Resultados de pruebas experimentales

3.4.1 Resultados de la prueba de jarras

Se eligieron tres ensayos para determinar los parámetros de diseño del sistema y la dosificación necesaria de coagulante y floculante. En la tabla 16 se presentan los resultados

de los parámetros de control antes de realizar las pruebas de jarras. Se eligió la dureza total, turbidez y los sólidos suspendidos totales de la caracterización inicial de los efluentes para determinar los porcentajes de remoción de los parámetros.

Tabla 16. Resultados de los parámetros de control antes de la prueba de jarras

Ensayo	Dureza total (ppm CaCO ₃)	Turbidez (NTU)	Sólidos suspendidos (mg/L)
1	260	135	235
2	300	100	268
3	335	109	275

Para cada muestra compuesta de agua residual se realizaron 25 ensayos experimentales en los que, para obtener la concentración adecuada de coagulante y floculante, se hicieron distintas combinaciones del diseño experimental.

El primer parámetro por analizar fue la dureza total, por lo que se utilizó el método volumétrico de EDTA. En la tabla 17 se presentan los resultados obtenidos del volumen consumido de ácido etilendiaminotetraacético para las distintas combinaciones de coagulante y floculante en los tres ensayos seleccionados.

Tabla 17. Volumen consumido de EDTA (mL)

		Floculante					
		Concentración [ppm]	50	100	200	350	500
Coagulante	50	Ensayo 1	8.20	7.65	8.35	8.40	8.05
		Ensayo 2	6.15	7.70	6.95	7.75	8.20
		Ensayo 3	8.40	7.95	6.55	7.80	8.80
	100	Ensayo 1	7.60	8.55	8.75	7.75	8.75
		Ensayo 2	7.60	8.75	8.70	6.25	8.85
		Ensayo 3	7.50	8.65	8.30	6.20	8.80
	200	Ensayo 1	8.90	5.75	6.30	9.40	9.20
		Ensayo 2	9.20	6.25	5.60	9.60	9.35
		Ensayo 3	9.35	6.65	7.15	9.30	9.25
	350	Ensayo 1	7.65	9.05	8.65	7.10	10.10
		Ensayo 2	7.95	9.90	8.60	7.95	9.95
		Ensayo 3	7.75	9.20	8.50	8.30	10.00

	500	Ensayo 1	6.50	6.05	5.90	7.15	6.60
		Ensayo 2	6.15	6.90	5.45	7.30	6.55
		Ensayo 3	6.60	6.40	5.35	7.35	6.70

El segundo parámetro por analizar son los sólidos suspendidos totales por método gravimétrico, para ello se necesita pesar el papel filtro antes de realizar la experimentación, como se puede observar en la tabla 18.

Tabla 18. Peso del papel filtro antes de la prueba (g)

		Floculante					
		Concentración [ppm]	50	100	200	350	500
Coagulante	50	Ensayo 1	0.5030	0.5071	0.4976	0.5070	0.4990
		Ensayo 2	0.5091	0.5107	0.5120	0.5026	0.5002
		Ensayo 3	0.4968	0.4997	0.5139	0.5045	0.4994
	100	Ensayo 1	0.5009	0.5048	0.5053	0.5009	0.5032
		Ensayo 2	0.5061	0.4955	0.5034	0.5070	0.4942
		Ensayo 3	0.5099	0.499	0.5034	0.4953	0.4988
	200	Ensayo 1	0.5098	0.5012	0.5056	0.5098	0.4876
		Ensayo 2	0.5108	0.5067	0.4979	0.5085	0.4964
		Ensayo 3	0.5065	0.4946	0.5070	0.5112	0.4920
	350	Ensayo 1	0.4968	0.5049	0.4936	0.4995	0.4948
		Ensayo 2	0.5033	0.4942	0.5003	0.5056	0.4931
		Ensayo 3	0.5024	0.5015	0.4996	0.5053	0.4940
	500	Ensayo 1	0.5003	0.5031	0.5018	0.4955	0.5090
		Ensayo 2	0.4921	0.5071	0.5040	0.5047	0.5085
		Ensayo 3	0.5067	0.4972	0.4905	0.4957	0.5087

En la tabla 19, se presentan los resultados del papel filtro después de realizar las pruebas con las distintas concentraciones de coagulante y floculante para las tres muestras compuestas.

Tabla 19. Peso del papel filtro después de la prueba (g)

		Floculante					
		Concentración [ppm]	50	100	200	350	500
Coagulante	50	Ensayo 1	0.5142	0.5188	0.5094	0.5193	0.5089
		Ensayo 2	0.5186	0.5191	0.5196	0.5136	0.5110
		Ensayo 3	0.5097	0.5115	0.5245	0.5125	0.5104

	100	Ensayo 1	0.5102	0.5142	0.5148	0.5116	0.5147
		Ensayo 2	0.5145	0.5034	0.5160	0.5175	0.5057
		Ensayo 3	0.5202	0.5095	0.5122	0.5029	0.5083
	200	Ensayo 1	0.5182	0.5099	0.5146	0.5193	0.5002
		Ensayo 2	0.5197	0.5159	0.5068	0.5197	0.5084
		Ensayo 3	0.5181	0.5049	0.5178	0.5234	0.5034
	350	Ensayo 1	0.5029	0.5104	0.5018	0.5095	0.5083
		Ensayo 2	0.5101	0.5063	0.5100	0.5155	0.5034
		Ensayo 3	0.5125	0.5117	0.5100	0.5153	0.5058
	500	Ensayo 1	0.5140	0.5130	0.5089	0.5065	0.5194
		Ensayo 2	0.4986	0.5147	0.5099	0.5129	0.5187
		Ensayo 3	0.5157	0.5070	0.4978	0.5060	0.5196

A partir de la ecuación 2.3 se determinó la concentración de sólidos suspendidos totales con los resultados de las tablas 18 y 19. Para el tercer parámetro de control se analizó la turbidez del agua residual, con la ayuda de un turbidímetro.

En la tabla 20, se pueden observar los resultados del primer ensayo; en la tabla 21, del segundo y en la tabla 22, del tercero para cada uno de los parámetros de control.

Tabla 20. Resultados de los variables después de las pruebas de jarras (Ensayo 1)

		Floculante					
		Concentración [ppm]	50	100	200	350	500
Coagulante	50	SST (mg/L)	44.80	46.80	47.20	49.20	39.60
		Dureza (ppm)	164.13	153.12	167.13	168.13	161.13
		Turbidez (NTU)	48.50	40.50	35.80	33.40	30.30
	100	SST (mg/L)	37.20	37.60	38.00	42.80	46.00
		Dureza (ppm)	152.12	171.14	175.14	155.12	175.14
		Turbidez (NTU)	44.80	44.60	33.50	31.60	29.10
	200	SST (mg/L)	33.60	34.80	36.00	38.00	50.40
		Dureza (ppm)	178.14	115.09	126.10	188.15	184.15
		Turbidez (NTU)	36.70	38.10	31.60	32.60	29.30
	350	SST (mg/L)	24.40	22.00	32.80	40.00	54.00
		Dureza (ppm)	153.12	181.14	173.14	142.11	202.16
		Turbidez (NTU)	39.30	32.50	29.40	28.20	25.90
	500	SST (mg/L)	54.80	39.60	28.40	44.00	41.60

	Dureza (ppm)	130.10	121.10	118.09	143.11	132.11
	Turbidez (NTU)	31.70	30.90	22.50	24.60	22.90

Tabla 21. Resultados de los variables después de las pruebas de jarras (Ensayo 2)

		Floculante					
		Concentración [ppm]	50	100	200	350	500
Coagulante	50	SST (mg/L)	38.00	33.60	30.40	44.00	43.20
		Dureza (ppm)	123.10	154.12	139.11	155.12	164.13
		Turbidez (NTU)	40.20	36.90	31.70	33.60	30.40
	100	SST (mg/L)	33.60	31.60	50.40	42.00	46.00
		Dureza (ppm)	152.12	175.14	174.14	125.10	177.14
		Turbidez (NTU)	40.90	39.60	32.40	24.60	26.10
	200	SST (mg/L)	35.60	36.80	35.60	44.80	48.00
		Dureza (ppm)	184.15	125.10	112.09	192.15	187.15
		Turbidez (NTU)	45.70	31.40	30.60	23.90	20.20
	350	SST (mg/L)	27.20	48.40	38.80	39.60	41.20
		Dureza (ppm)	159.13	198.16	172.14	159.13	199.16
		Turbidez (NTU)	36.30	25.50	23.40	21.20	19.90
	500	SST (mg/L)	26.00	30.40	23.60	32.80	40.80
		Dureza (ppm)	123.10	138.11	109.09	146.12	131.10
		Turbidez (NTU)	25.70	23.60	20.40	23.20	22.90

Tabla 22. Resultados de los variables después de las pruebas de jarras (Ensayo 3)

		Floculante					
		Concentración [ppm]	50	100	200	350	500
Coagulante	50	SST (mg/L)	51.60	47.20	42.40	32.00	44.00
		Dureza (ppm)	168.13	159.13	131.10	156.12	176.14
		Turbidez (NTU)	40.40	35.60	30.40	28.30	28.90
	100	SST (mg/L)	41.20	42.00	35.20	30.40	38.00
		Dureza (ppm)	150.12	173.14	166.13	124.10	176.14
		Turbidez (NTU)	40.50	37.40	29.90	22.70	17.40
	200	SST (mg/L)	46.40	41.20	43.20	48.80	45.60
		Dureza (ppm)	187.15	133.11	143.11	186.15	185.15
		Turbidez (NTU)	37.90	35.70	29.50	22.60	20.90
	350	SST (mg/L)	40.40	40.80	41.60	40.00	47.20
		Dureza (ppm)	155.12	184.15	170.14	166.13	200.16

		Turbidez (NTU)	25.90	23.70	21.80	20.70	19.20
	500	SST (mg/L)	36.00	39.20	29.20	41.20	43.60
		Dureza (ppm)	132.11	128.10	107.09	147.12	134.11
		Turbidez (NTU)	24.90	23.40	19.50	21.50	21.10

A partir de la ecuación 2.5 se determinó el porcentaje de reducción de los parámetros que se están analizando como indicadores en la calidad del fluido. Para ello, se relacionaron los valores iniciales de la tabla 16 junto con los finales de las tablas 20, 21 y 22.

En las tablas 23, 24 y 25 se presentan los porcentajes de remoción de los contaminantes en los efluentes para cada uno de los tres ensayos realizados.

Tabla 23. Resultados del porcentaje de remoción (Ensayo 1)

		Floculante					
		Concentración [ppm]	50	100	200	350	500
Coagulante	50	SST (%)	80.94	80.09	79.91	79.06	83.15
		Dureza (%)	36.87	41.11	35.72	35.33	38.03
		Turbidez (%)	64.07	70.00	73.48	75.26	77.56
	100	SST (%)	84.17	84.00	83.83	81.79	80.43
		Dureza (%)	41.49	34.18	32.64	40.34	32.64
		Turbidez (%)	66.81	66.96	75.19	76.59	78.44
	200	SST (%)	85.70	85.19	84.68	83.83	78.55
		Dureza (%)	31.48	55.73	51.50	27.63	29.17
		Turbidez (%)	72.81	71.78	76.59	75.85	78.30
	350	SST (%)	89.62	90.64	86.04	82.98	77.02
		Dureza (%)	41.11	30.33	33.41	45.34	22.25
		Turbidez (%)	70.89	75.93	78.22	79.11	80.81
	500	SST (%)	76.68	83.15	87.91	81.28	82.30
		Dureza (%)	49.96	53.42	54.58	44.96	49.19
		Turbidez (%)	76.52	77.11	83.33	81.78	83.04

Tabla 24. Resultados del porcentaje de remoción (Ensayo 2)

		Floculante					
		Concentración [ppm]	50	100	200	350	500
Coagulante	50	SST (%)	85.82	87.46	88.66	83.58	83.88
		Dureza (%)	58.97	48.63	53.63	48.29	45.29
		Turbidez (%)	59.80	63.10	68.30	66.40	69.60

	100	SST (%)	87.46	88.21	81.19	84.33	82.84
		Dureza (%)	49.29	41.62	41.95	58.30	40.95
		Turbidez (%)	59.10	60.40	67.60	75.40	73.90
	200	SST (%)	86.72	86.27	86.72	83.28	82.09
		Dureza (%)	38.62	58.30	62.64	35.95	37.62
		Turbidez (%)	54.30	68.60	69.40	76.10	79.80
	350	SST (%)	89.85	81.94	85.52	85.22	84.63
		Dureza (%)	46.96	33.95	42.62	46.96	33.61
		Turbidez (%)	63.70	74.50	76.60	78.80	80.10
	500	SST (%)	90.30	88.66	91.19	87.76	84.78
		Dureza (%)	58.97	53.96	63.64	51.29	56.30
		Turbidez (%)	74.30	76.40	79.60	76.80	77.10

Tabla 25. Resultados del porcentaje de remoción (Ensayo 3)

		Floculante					
		Concentración [ppm]	50	100	200	350	500
Coagulante	50	SST (%)	81.24	82.84	84.58	88.36	84.00
		Dureza (%)	49.81	52.50	60.86	53.40	47.42
		Turbidez (%)	62.94	67.34	72.11	74.04	73.49
	100	SST (%)	85.02	84.73	87.20	88.95	86.18
		Dureza (%)	55.19	48.32	50.41	62.96	47.42
		Turbidez (%)	62.84	65.69	72.57	79.17	84.04
	200	SST (%)	83.13	85.02	84.29	82.25	83.42
		Dureza (%)	44.13	60.27	57.28	44.43	44.73
		Turbidez (%)	65.23	67.25	72.94	79.27	80.83
	350	SST (%)	85.31	85.16	84.87	85.45	82.84
		Dureza (%)	53.69	45.03	49.21	50.41	40.25
		Turbidez (%)	76.24	78.26	80.00	81.01	82.39
	500	SST (%)	86.91	85.75	89.38	85.02	84.15
		Dureza (%)	60.57	61.76	68.03	56.08	59.97
		Turbidez (%)	77.16	78.53	82.11	80.28	80.64

En las tablas 23, 24 y 25 se puede observar que la combinación en la que se obtiene un mayor porcentaje de remoción de contaminantes es en 500 ppm de coagulante (policloruro de aluminio) y 200 ppm de floculante (poliacrilamida).

Así que, para observar la tendencia en los resultados se realizó un promedio de los tres ensayos realizados para cada una de las combinaciones aplicadas (tabla 26).

Tabla 26. Resultados promedios de los porcentajes de remoción

		Floculante					
		Concentración [ppm]	50	100	200	350	500
Coagulante	50	SST (%)	82.66	83.46	84.38	83.67	83.68
		Dureza (%)	48.55	47.41	50.07	45.67	43.58
		Turbidez (%)	62.27	66.81	71.30	71.90	73.55
	100	SST (%)	85.55	85.65	84.07	85.02	83.15
		Dureza (%)	48.66	41.37	41.67	53.86	40.34
		Turbidez (%)	62.92	64.35	71.78	77.06	78.79
	200	SST (%)	85.18	85.49	85.23	83.12	81.35
		Dureza (%)	38.08	58.10	57.14	36.01	37.17
		Turbidez (%)	64.11	69.21	72.98	77.07	79.64
	350	SST (%)	88.26	85.91	85.48	84.55	81.49
		Dureza (%)	47.25	36.44	41.75	47.57	32.04
		Turbidez (%)	70.28	76.23	78.27	79.64	81.10
	500	SST (%)	84.63	85.85	89.50	84.69	83.74
		Dureza (%)	56.50	56.38	62.08	50.78	55.15
		Turbidez (%)	75.99	77.35	81.68	79.62	80.26

De la misma manera, la combinación con mayor porcentaje de remoción fue la de 500 ppm para el coagulante y 200 ppm de floculante.

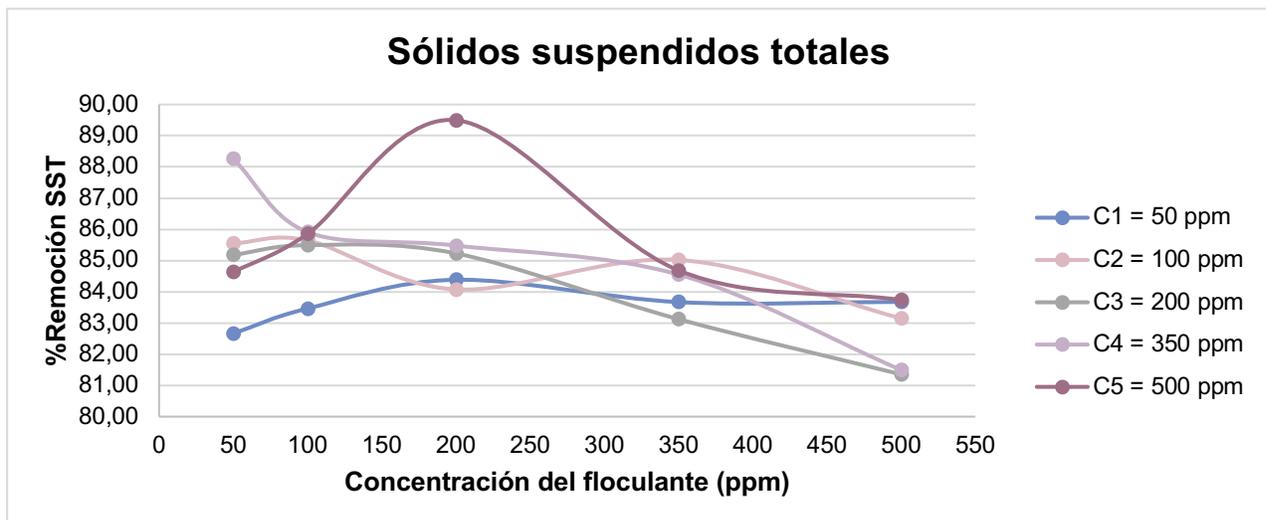


Figura 3. Sólidos suspendidos totales en función de la concentración del floculante

En la figura 3, se puede observar la variación entre las diferentes combinaciones de coagulante y floculante con respecto al porcentaje de remoción en los sólidos suspendidos totales. Casi todas las combinaciones presentan una tendencia creciente desde los 50 ppm hasta los 200 ppm en el floculante y a partir de ese punto decrecen significativamente, con pequeños incrementos en 350 ppm de poliacrilamida. Excepto por la concentración 4 del coagulante (350 ppm), que en toda la trayectoria fue decreciendo. No obstante, a 500 ppm de policloruro de aluminio (C5), se presenta un mayor pico en la curva de remoción (89.50%) a 200 ppm de poliacrilamida.

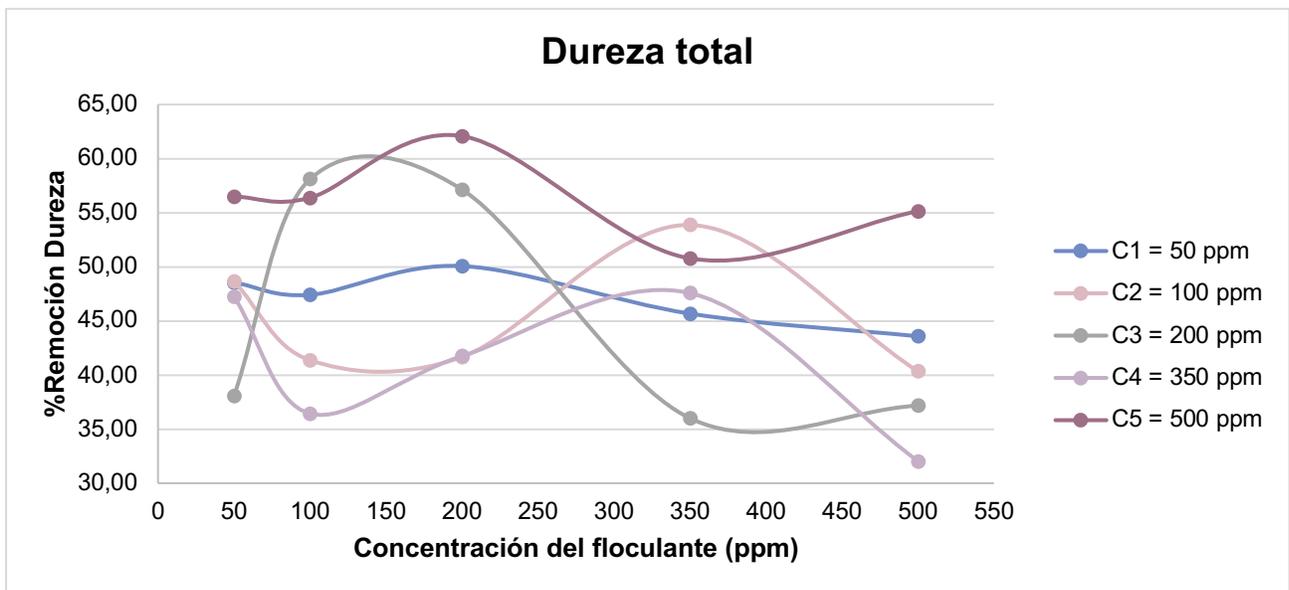


Figura 4. Dureza total en función de la concentración del floculante

La figura 4 presenta el porcentaje de remoción de la dureza total con respecto a las combinaciones de coagulante y floculante. Del mismo modo, a una concentración del coagulante de (50, 200 y 500) ppm, se presenta un crecimiento en el floculante desde los 100 ppm hasta los 200 ppm. Luego, decrecen hasta los 350 ppm y vuelven a crecer hasta la última concentración propuesta. Por otro lado, las curvas de (100 y 350) ppm presentan una tendencia distinta, en las que primero decrecen y luego crecen. No obstante, la combinación que presenta la máxima concentración de remoción en la dureza (62.08%), es la de 500 ppm de coagulante y 200 ppm de floculante.

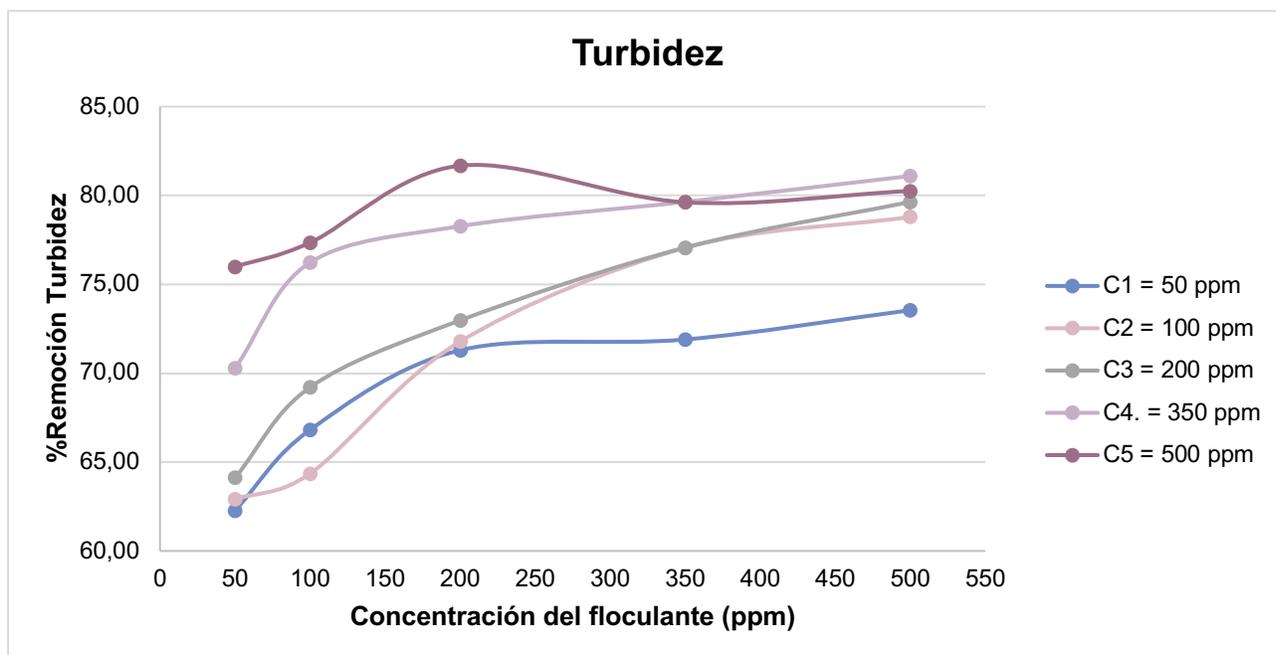


Figura 5. Turbidez en función de la concentración del floculante

En la figura 5 se presenta el porcentaje de remoción de la turbidez con respecto a las combinaciones de floculante y coagulante. Se observa que para las cinco curvas la tendencia es la misma y el porcentaje de reducción aumenta al incrementar la concentración del floculante y coagulante. La concentración máxima se encuentra a 500 ppm de policloruro de aluminio y 200 ppm de poliacrilamida.

Conforme se muestra en la tabla 26 y las figuras 3, 4 y 5, la mejor combinación para el diseño es a 500 ppm de policloruro de aluminio y 200 ppm de poliacrilamida. Debido a que, los porcentajes de remoción para la dureza total (62.08%), sólidos suspendidos totales (89.50%) y turbidez del fluido (81.68%) fueron los mayores durante toda la experimentación para cada uno de los ensayos realizados.

En la tabla 27 se presentan los resultados del método de validación empleado en siete muestras compuestas de aguas residuales. Se tomó como referencia el porcentaje de remoción en los sólidos suspendidos totales y la turbidez del efluente. En ambos parámetros los resultados fueron superiores al 80%, lo cual demuestra que las concentraciones obtenidas en la experimentación son las más idónea para el diseño.

Tabla 27. Resultados de la validación del método de coagulación y floculación

Número de ensayo	Sólidos suspendidos totales			Turbidez		
	Concentración Inicial (mg/L)	Concentración Final (mg/L)	Porcentaje de Remoción (%)	Inicial (NTU)	Final (NTU)	Porcentaje de Remoción (%)
1	194.00	26.50	86.34	132.00	23.10	82.50
2	200.00	28.90	85.55	128.00	24.60	80.78
3	204.00	27.90	86.32	174.00	25.30	85.46
4	252.00	32.10	87.26	145.00	25.90	82.14
5	285.00	35.10	87.68	186.00	27.40	85.27
6	295.00	36.40	87.66	192.00	29.30	84.74
7	300.00	38.30	87.23	203.00	30.20	85.12

3.4.2 Resultados de la columna de intercambio iónico

La tabla 28 muestra la variación en la concentración de cloruros en unidades de miliequivalentes por litro (meq/L). Se determinó su concentración inicial y final por medio de pruebas de caracterización para poder analizar la cantidad de cloruros removidos en cada muestra.

Tabla 28. Concentración de Cloruros

Muestra	Concentración Cl ⁻ [meq/L]	
	Inicial	Final
1	13	2.35
2	29	4.55
3	22	3.6

La tabla 29 brinda información sobre los resultados obtenidos en la experimentación, donde se midieron los parámetros de pH y conductividad que fueron obtenidos mediante un multiparámetro, permitiendo evaluar el uso de la resina como medio de intercambio iónico a escala de laboratorio en las 3 muestras seleccionadas. Se realizaron 5 ensayos en la columna de cromatografía de iones con cada muestra, en un volumen de 200 mL para cada prueba, teniendo un total de 15 ensayos.

Tabla 29. Resultados de parámetros: Conductividad y pH

Muestra 1						
Conductividad [$\mu\text{S/cm}$]						
Ensayos	1	2	3	4	5	Promedio
Inicial	1372	1372.1	1372.2	1372	1372.3	1372.12
Final	211.9	245.6	249.4	267.8	268.3	248.6
Diferencia	1160.1	1126.5	1122.8	1104.2	1104	1123.52
%Remoción	85%	82%	82%	80%	80%	82%
pH						
Inicial	6.5	6.8	6.4	6.3	6.8	6.56
Final	8.1	8.2	8.19	7.8	8.2	8.098
Muestra 2						
Conductividad [$\mu\text{S/cm}$]						
Ensayos	1	2	3	4	5	Promedio
Inicial	3061.1	3029.4	3018.9	3008.5	3018	3027.18
Final	475	485.6	469.7	480.3	490.8	480.28
Diferencia	2586.1	2543.8	2549.2	2528.2	2527.2	2546.9
%Remoción	84%	84%	84%	84%	84%	84%
pH						
Inicial	6.98	6.85	6.8	6.83	6.92	6.88
Final	8.1	8.2	8.2	8.1	8	8.12
Muestra 3						
Conductividad [$\mu\text{S/cm}$]						
Ensayos	1	2	3	4	5	Promedio
Inicial	2322	2322.2	2353.6	2358.1	2332	2337.58
Final	380.1	380	390.6	358.9	390.6	380.04
Diferencia	1941.9	1942.2	1963	1999.2	1941.4	1957.54
%Remoción	84%	84%	83%	85%	83%	84%
pH						
Inicial	6.95	6.94	6.93	6.91	6.91	6.93
Final	8.1	8.1	8	8.2	8	8.08

Por otro lado, la tabla 30 muestra un resumen de los promedios de estas mediciones con una visión más general de los resultados.

Tabla 30. Resultados promedio de parámetros: Conductividad y pH

Conductividad $\mu\text{S/cm}$			
Muestra	1	2	3
Inicial	1372.12	3027.18	2337.58
Final	248.6	480.28	380.04
Diferencia	1123.52	2546.9	1957.54
%Remoción	82%	84%	84%
pH			
Inicial	6.56	6.88	6.93
Final	8.098	8.12	8.08

Mediante las figuras 6, 7, 8, 9 y 10 se obtuvo una representación de manera gráfica de los resultados obtenidos en la experimentación en relación con los ensayos, permitiendo tener una mejor visualización del comportamiento y la tendencia en cada experimento realizado.

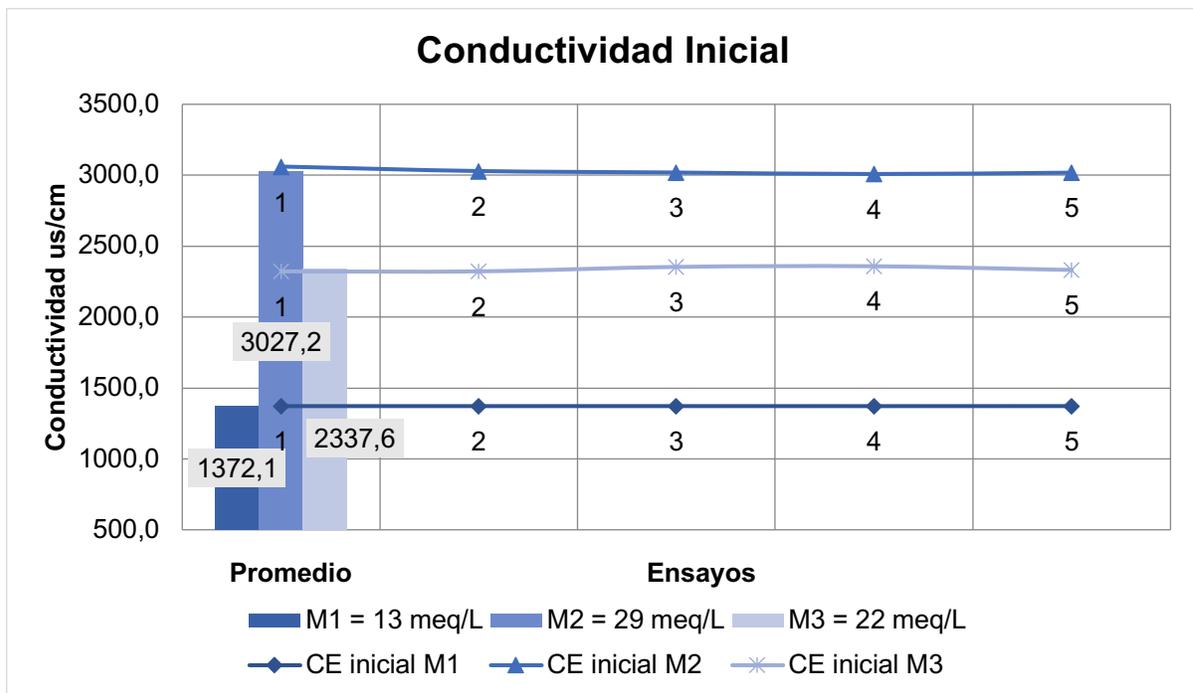


Figura 6. Conductividad inicial vs. Número de ensayos

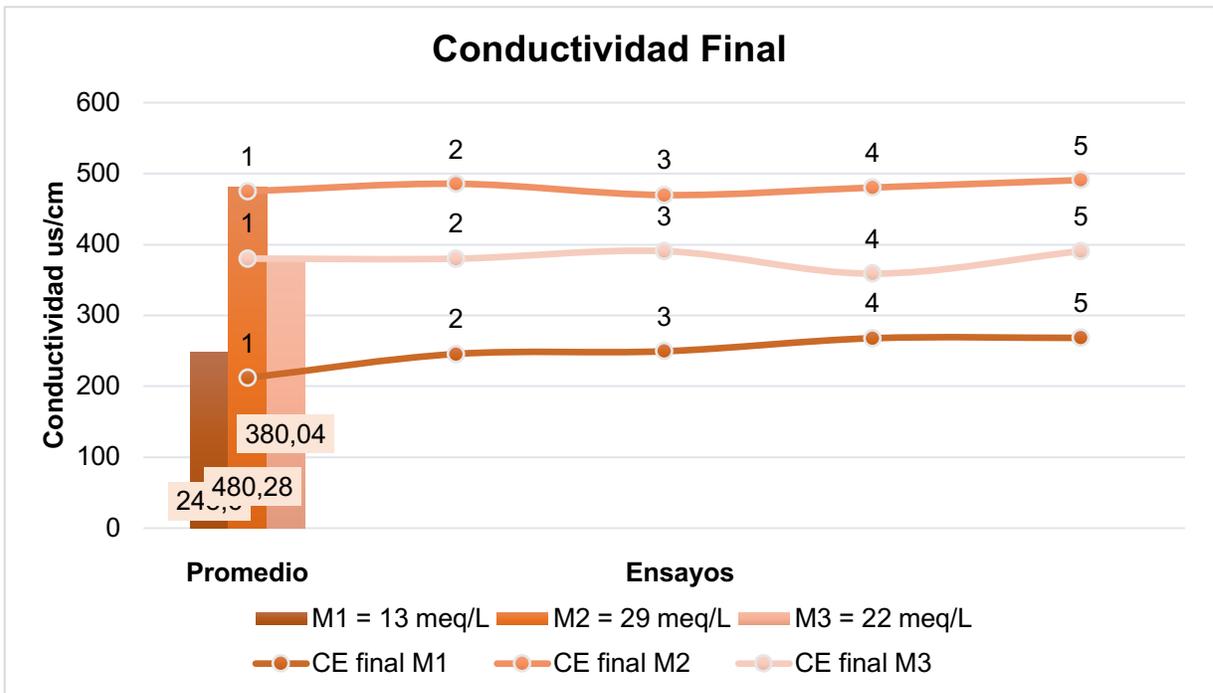


Figura 7. Conductividad final vs. Número de ensayos

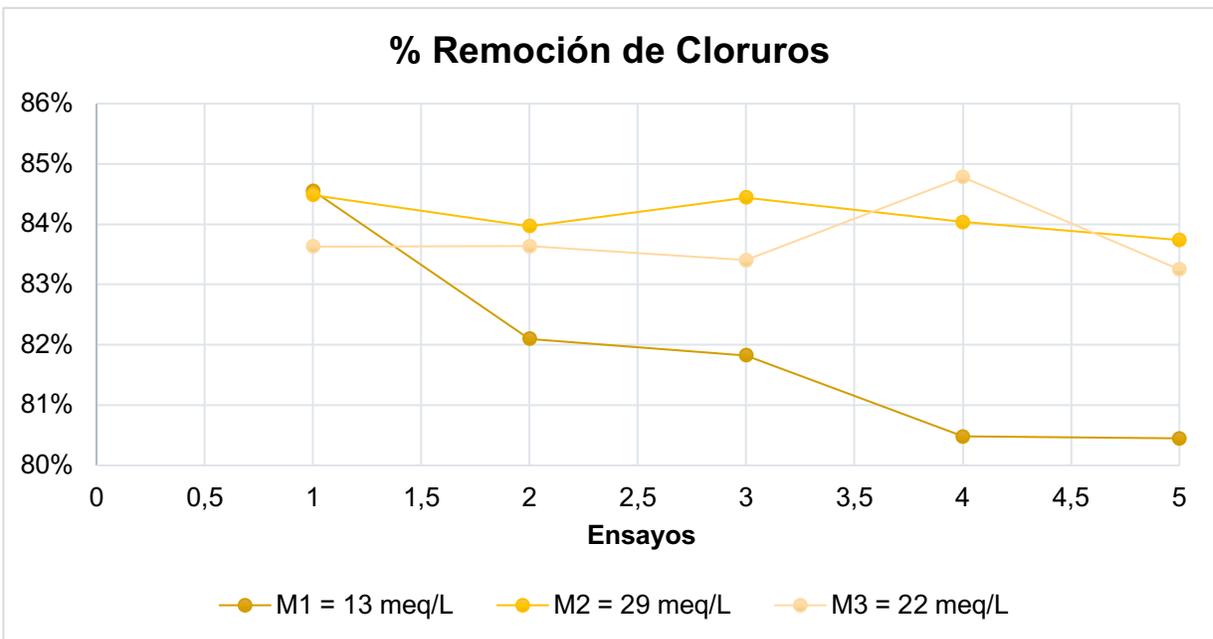


Figura 8. Porcentaje de Remoción de cloruros vs. Número de ensayos

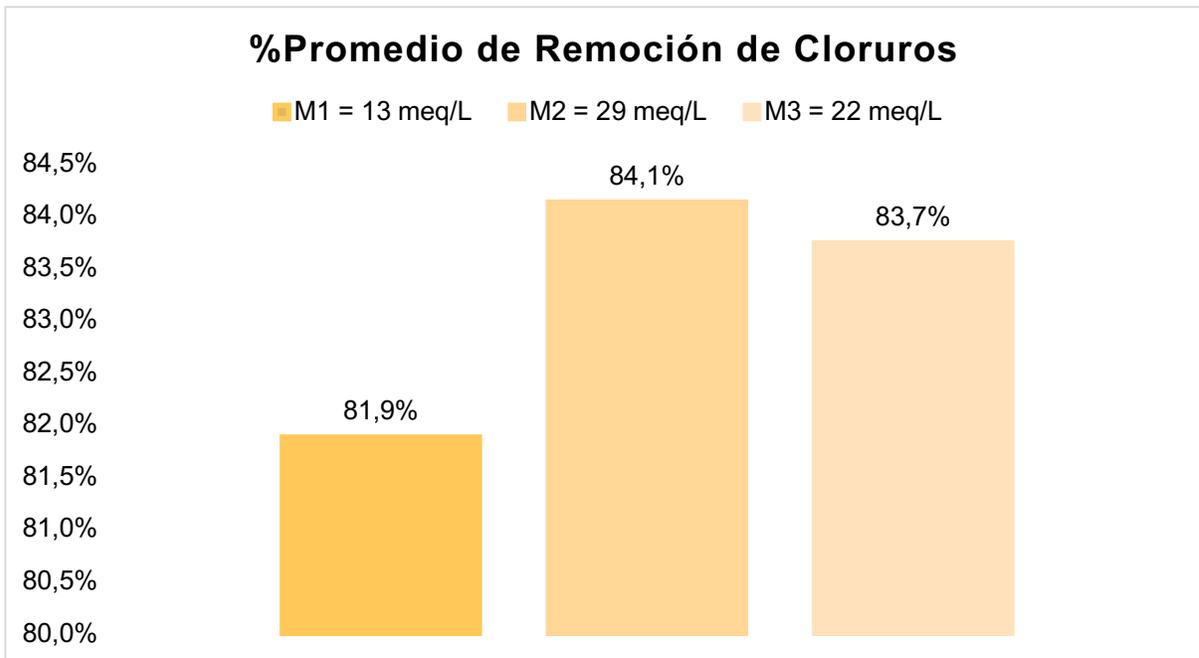


Figura 9. Porcentaje promedio de remoción de cloruros

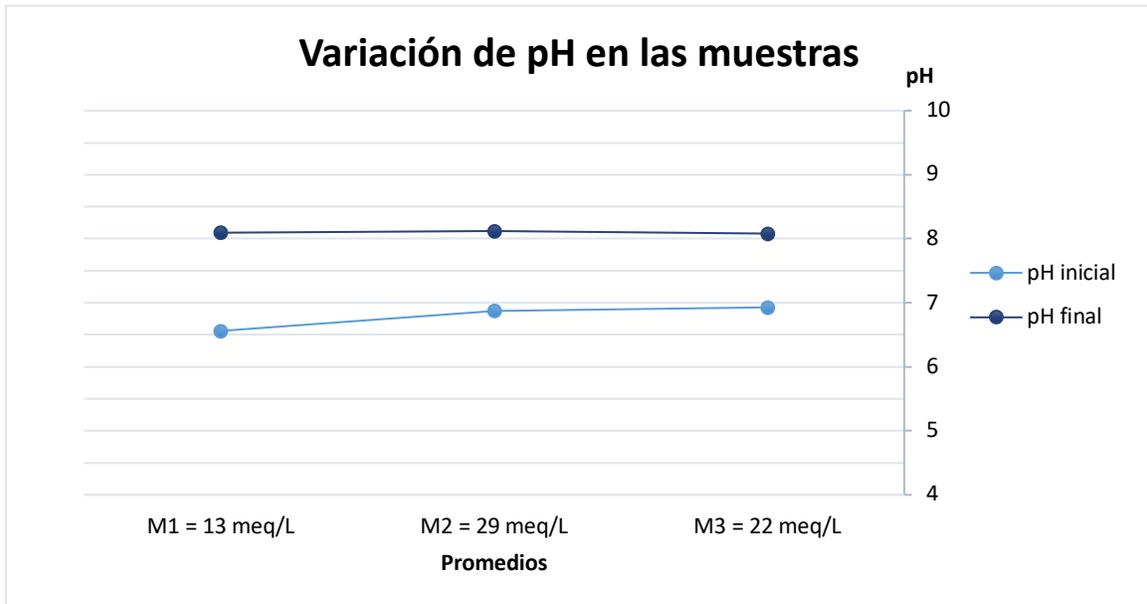


Figura 10. Variación del pH en las muestras

3.5 Diagrama de flujo del proceso

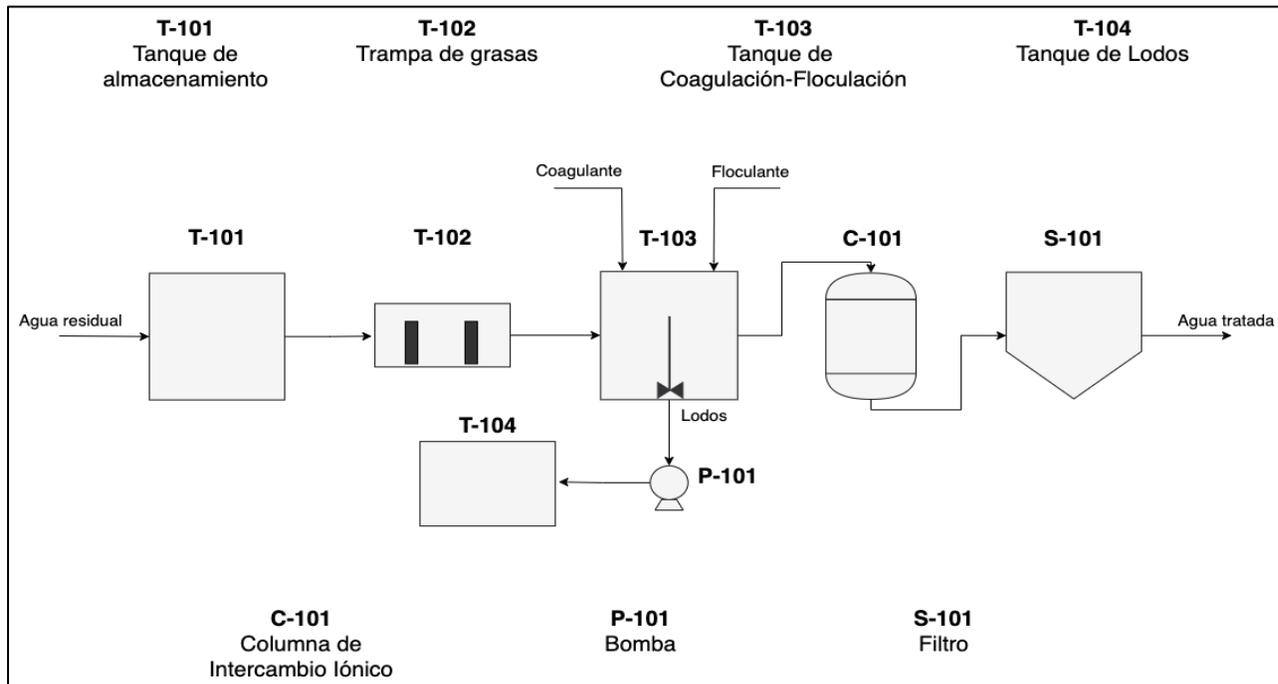


Figura 11. Esquematación del diagrama de flujo del proceso

En la figura 11 se presenta el diagrama de flujo del proceso que se propone para el centro de análisis ambiental. Como se había establecido en el diagrama de bloques, el agua residual se acumulará en un tanque de almacenamiento durante toda una jornada laboral. Luego pasará a una trampa de grasas que se encargará eliminar los sólidos suspendidos y las grasas presentes en los efluentes, ya que la presencia de estos contaminantes podría dañar los equipos del sistema. Posteriormente el fluido pasará a un tanque de coagulación y floculación con agitación, en el que se agregará una concentración de 500 ppm de policloruro de aluminio (coagulante) y 200 ppm de poliacrilamida (floculante).

Debido a que en el proceso se forman sedimentos, se propone agregar una bomba al sistema para que succione los fangos y los almacene en un tanque de lodos que permita darle el tratamiento correspondiente. Por consiguiente, el fluido previamente tratado, pasará a una columna de intercambio iónico para remover los cloruros presentes y al final habrá un filtro que elimine las impurezas que hayan quedado durante todo el proceso y se obtenga el agua esperada.

3.6 Diseño de las operaciones unitarias

3.6.1 Dimensionamiento del tanque de almacenamiento

Los tanques de almacenamiento se utilizan como recipientes para acumular la cantidad suficiente de un fluido a fin de emplearlo después. Por tanto, para el diseño se propuso un tanque cilíndrico vertical con fondo plano para almacenar los efluentes provenientes de las distintas áreas del centro de análisis ambiental durante su jornada laboral. Cabe destacar que se eligió ese modelo, ya que acorde a la literatura, este tipo de tanque posee una amplia capacidad a un bajo costo.

Para el dimensionamiento del tanque se requiere la tasa de flujo volumétrico que ingresará y el tiempo promedio en que las aguas residuales permanecerán en el depósito, tal y como se puede observar en la Tabla 31.

Tabla 31. Condiciones de diseño para el tanque de almacenamiento

Variable	Valor
Caudal máximo	0.80 L/min
Tiempo de residencia	660 min

En la figura 12 se presenta el esquema estándar de un tanque de almacenamiento cilíndrico vertical, en el que los símbolos presentes representan lo siguiente:

h = Altura del tanque de almacenamiento.

D_t = Diámetro del tanque de almacenamiento.

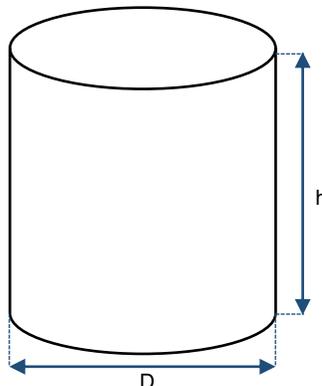


Figura 12. Esquema estándar del tanque almacenamiento

Para determinar el volumen del tanque de almacenamiento se relaciona el caudal máximo experimental con el tiempo de residencia, empleando la ecuación 3.1.

$$V_{\max} = Q_{\max} * t_r \quad (3.1)$$

$$V_{\max} = 0.80 \frac{\text{L}}{\text{min}} * 660 \text{ min}$$

$$V_{\max} = 528 \text{ L}$$

Al ser un diseño basado en pruebas experimentales, se asume un porcentaje de amortiguación o error del 25%, ya que las jornadas de trabajo en el centro de análisis ambiental pueden variar significativamente. Así que, se emplea la ecuación 3.2 para determinar el volumen del tanque.

$$V_{\text{tanque}} = V_{\max} * \%_{\text{amortiguación}} \quad (3.2)$$

$$V_{\text{tanque}} = 528 \text{ L} * 1.25$$

$$V_{\text{tanque}} = 660 \text{ L}$$

Utilizando la ecuación 3.3 del libro “Potabilización del agua: Principios de diseño, control de procesos y laboratorio Primera Edición”, se determinó la altura del tanque de almacenamiento (Lozano, 2015).

$$h = \sqrt[3]{\frac{2}{\pi} * V_{\text{tanque}}} \quad (3.3)$$

$$h = \sqrt[3]{\frac{2}{\pi} * 660 \text{ L} * \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ L}}}$$

$$h = 0.75 \text{ m}$$

De la misma manera, se empleó la ecuación 3.4 de la literatura para determinar el radio del tanque de almacenamiento (Lozano, 2015).

$$r = \sqrt{\frac{h^2}{2}} \quad (3.4)$$

$$r = \sqrt{\frac{(0.75 \text{ m})^2}{2}}$$

$$r = 0.53 \text{ m}$$

Para equipos con forma cilíndrica, el diámetro es dos veces la longitud del radio. Así que se empleó la ecuación 3.5 para determinar el diámetro del tanque de almacenamiento (Pérez, 2020).

$$D_t = 2 * r \quad (3.5)$$

$$D_t = 2 * 0.53 \text{ m}$$

$$D_t = 1.06 \text{ m}$$

Del libro “Matemáticas prácticas Segunda Edición” se utilizó la ecuación 3.6 para determinar el área total del tanque de almacenamiento (Palme & Bibb, 2003).

$$A_{\text{tanque}} = 2\pi rh + 2\pi r^2 \quad (3.6)$$

$$A_{\text{tanque}} = 2\pi * 0.53 \text{ m} (0.75 \text{ m} + 0.53\text{m})$$

$$A_{\text{tanque}} = 4.26 \text{ m}^2$$

En la tabla 32 se presentan las dimensiones necesarias para el diseño del tanque de almacenamiento.

Tabla 32. Dimensiones del tanque de almacenamiento

Descripción	Simbología	Valor
Área del tanque	A_{tanque}	4.26 m ²
Volumen del tanque	V_{tanque}	0.66 m ³
Diámetro del tanque	D_t	1.06 m
Radio del tanque	r	0.53 m
Altura del tanque	h	0.75 m

3.6.2 Dimensionamiento de la trampa de grasas

Fundamentalmente las trampas de grasas son sistemas rectangulares de movimiento mecánico por flotación. La metodología se basa en separar las grasas y sólidos suspendidos del fluido por medio de una separación de fases, aprovechando la fuerza de gravedad, velocidad mínima del agua residual y la desigualdad entre la densidad del efluente y las grasas. Por lo general, las trampas de grasas contienen tres cámaras que han sido separadas por dos pantallas. La primera sección es donde el flujo ingresa y queda retenido, por lo que se ve obligado a cruzar por la parte inferior hasta la otra división, en la sección intermedia los aceites y grasas ascienden, ya que su densidad es menor y el flujo de agua libre de grasas continua por la parte inferior hacia el último compartimento.

Por la turbulencia del fluido, en las dos primeras regiones, es donde quedan la mayor cantidad de sólidos e hidrocarburos. La tercera sección es por donde sale el agua y se intenta que pase al siguiente equipo con la mínima cantidad de grasa.

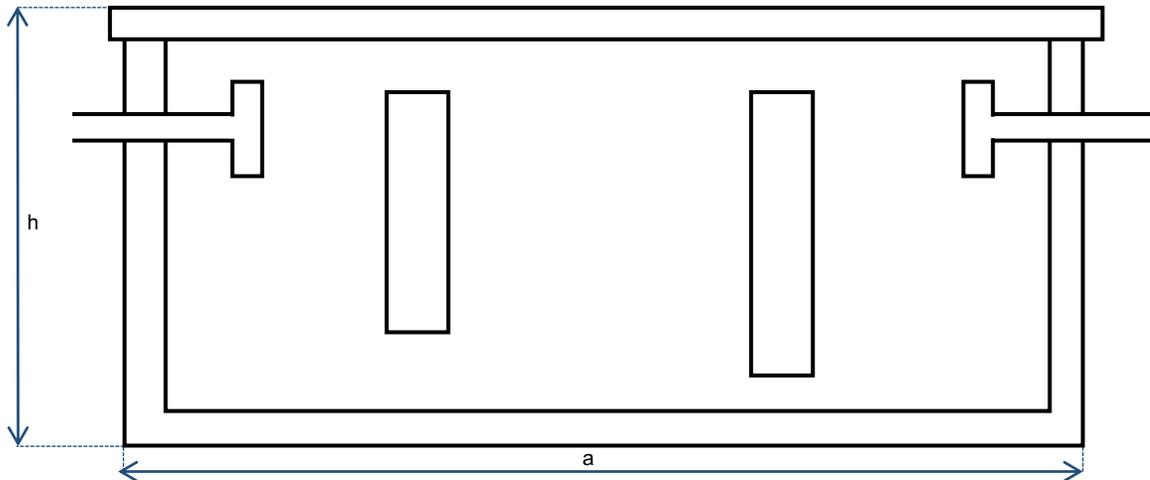


Figura 13. Esquema de la trampa de grasas

En la figura 13, se puede observar el esquema estándar de una trampa de grasas. Los símbolos expresados en el diagrama representan lo siguiente:

a = Ancho de la trampa de grasas.

l = Largo de la trampa de grasas.

h = Altura de la trampa de grasas.

Para el dimensionamiento se debe tener en cuenta el caudal máximo experimental de las aguas residuales y el tiempo de residencia típico. De acuerdo con el “Reglamento Técnico del Sector de agua potable y saneamiento básico, Sección II Título E para Tratamiento de aguas residuales”, se establece un tiempo de retención hidráulica para un caudal de ingreso determinado en las trampas de grasas (Ministerio de Desarrollo Económico, 2000).

Tabla 33. Caudal y tiempo de retención hidráulica para trampas de grasas (RAR, 2000)

Tiempo de residencia (min)	Caudal máximo de ingreso (L/s)
3	2 - 9
4	10 - 19
5	Más de 20

Con respecto a la Tabla 34, al tener un caudal máximo de 0.80 L/min, equivalente a 0.013 L/s, se eligió 2 L/s como caudal máximo de ingreso, ya que es el valor más cercano al caudal del sistema; por lo tanto, el tiempo de residencia será igual a 3 min.

Tabla 34. Condiciones de diseño para la trampa de grasas

Variable	Valor
Caudal máximo	0.80 L/min
Tiempo de residencia	3 min

Empleando la ecuación 3.1 se determinó el volumen de la trampa de grasas, relacionando el tiempo de retención con el caudal experimental.

$$V_{\max} = Q_{\max} * t_r \quad (3.1)$$

$$V_{\max} = 0.80 \frac{\text{L}}{\text{min}} * 3 \text{ min}$$

$$V_{\max} = 2.40 \text{ L}$$

Se utilizó la ecuación 3.7 para determinar el área total, tomando como base el valor de la velocidad ascendente mínima, 0.004 m/s, presentado en la Normativa RAS - 2000 y el caudal de diseño de la tabla 34.

$$A_T = \frac{Q_{\max}}{V_a} \quad (3.7)$$

$$A_T = \frac{0.80 \frac{\text{L}}{\text{min}} * \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ L}} * \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}}}{0.004 \frac{\text{m}}{\text{s}}}$$

$$A_T = 0.033 \text{ m}^2$$

Del mismo modo, de acuerdo con el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable, las dimensiones de las trampas de grasas se determinaron con la relación ancho/longitud que es de 1:4, como se presenta en la ecuación 3.8.

$$a = 4 * l \quad (3.8)$$

Teniendo en cuenta que el área total de la trampa de grasas, también se representa con la ecuación 3.9.

$$A_T = 4 * l^2 \quad (3.9)$$

Por lo que, despejando el largo de la trampa de grasas (l), de la ecuación 3.9, se obtiene la ecuación 3.10.

$$l = \sqrt{\frac{A_T}{4}} \quad (3.10)$$

$$l = \sqrt{\frac{0.033 \text{ m}^2}{4}}$$

$$l = 0.091 \text{ m}$$

Reemplazando el valor de “l” en la ecuación 3.8, se obtiene el ancho de la trampa de grasas.

$$a = 4 * 0.091 \text{ m}$$

$$a = 0.36 \text{ m}$$

Por último, de acuerdo con la Normativa RAS – 2000, se obtiene que la altura es igual a la diferencia entre el volumen máximo y el área total de la trampa de grasas, como se presenta en la ecuación 3.11.

$$h = \frac{V_{\max}}{A_T} \quad (3.11)$$

$$h = \frac{2.40 \text{ L} * \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ L}}}{0.033 \text{ m}^2}$$

$$h = 0.73 \text{ m}$$

En la tabla 35 se presentan las dimensiones necesarias para el diseño de la trampa de grasas.

Tabla 35. Dimensiones de la trampa de grasas

Descripción	Simbología	Valor
Área de la trampa de grasas	A_T	0.033 m ²
Volumen de la trampa de grasas	V_{\max}	0.024 m ³
Ancho de la trampa de grasas	a	0.36 m
Largo de la trampa de grasas	l	0.091 m
Altura de la trampa de grasas	h	0.73 m

Para dimensionar las pantallas de una trampa de grasas y que el proceso sea más eficiente, se establecen las siguientes condiciones de acuerdo con la Normativa RAS - 2000.

La altura de las pantallas corresponde al 90% del nivel de la trampa de grasas, como se presenta en la ecuación 3.12.

$$\begin{aligned}H_p &= h * 0.90 & (3.12) \\H_p &= 0.73 \text{ m} * 0.90 \\H_p &= 0.66 \text{ m}\end{aligned}$$

Para el espacio entre la lámina y el fondo de la primera pantalla, corresponde al 10% de la altura de la trampa de grasas, como se puede ver en la ecuación 3.13.

$$\begin{aligned}H_{f1} &= h * 0.10 & (3.13) \\H_{f1} &= 0.73 \text{ m} * 0.10 \\H_{f1} &= 0.073 \text{ m}\end{aligned}$$

Del mismo modo, para la segunda pantalla hay un 25% de la altura del equipo, como se presenta en la ecuación 3.14.

$$\begin{aligned}H_{f2} &= h * 0.25 & (3.14) \\H_{f2} &= 0.73 \text{ m} * 0.25 \\H_{f2} &= 0.18 \text{ m}\end{aligned}$$

Para la ubicación del codo de la tubería de ingreso y salida de la trampa, se ubica al 50% de la longitud del equipo, como se ve en la ecuación 3.15.

$$\begin{aligned}L_c &= l * 0.50 & (3.15) \\L_c &= 0.091 \text{ m} * 0.50 \\L_c &= 0.045 \text{ m}\end{aligned}$$

Mientras que la distancia para el codo de la tubería se encontrará a un 35% de la altura de la trampa de grasas, como la ecuación 3.16.

$$\begin{aligned}H_c &= h * 0.35 & (3.16) \\H_c &= 0.73 \text{ m} * 0.35 \\H_c &= 0.25 \text{ m}\end{aligned}$$

En la tabla 36 se presentan las dimensiones necesarias para la ubicación de las pantallas y codos de la trampa de grasas.

Tabla 36. Dimensiones de la trampa de grasas

Descripción	Simbología	Valor
Altura de las pantallas	H_P	0.66 m
Altura entre lámina y fondo 1	H_{f1}	0.073 m
Altura entre lámina y fondo 1	H_{f2}	0.18 m
Longitud del codo	L_c	0.045 m
Distancia para el codo	H_c	0.25 m

3.6.3 Dimensionamiento del tanque de coagulación y floculación

3.6.3.1 Dimensionamiento del tanque

Para dimensionar un tanque de coagulación y floculación, los factores claves son: el caudal máximo de entrada al equipo y el tiempo de residencia, que es lo que tarda en realizarse la perturbación de las partículas coloidales generadas.

De acuerdo con la información bibliográfica obtenida del libro “Ingeniería del Tratamiento de Aguas residuales y reutilización Ed. 4” se definió que el tiempo de agitación para que el coagulante se mezcle en su totalidad con el agua, está en un rango de 5 a 15 minutos. De la misma manera, para facilitar la formación de flóculos, se agregó el polímero orgánico como floculante, el cual demora más en efectuar la adición de partículas coloidales. Por lo que, según la literatura, el tiempo de homogeneización para el floculante está en un rango de 25 a 30 minutos.

Después de que ha parado la agitación de la mezcla, se deja sedimentar la muestra y acorde a la literatura, el tiempo de sedimentación para los sistemas que utilizan polímeros para coagular y flocular está en un rango de 55 a 70 minutos. El tiempo de residencia para el tanque se definirá por el periodo que tarda en homogeneizar el coagulante, floculante y en sedimentarse la muestra (Tchobanoglous & Burton, 2003).

Para el diseño se utilizó el caudal máximo experimental, ya que permite relacionar la cantidad límite de efluente que ingresa al sistema en un tiempo determinado. En la tabla 37 se pueden observar las condiciones para el dimensionamiento del tanque.

Tabla 37. Condiciones de diseño para el tanque de coagulación y floculación

Variable	Valor
Caudal máximo	0.80 L/min
Tiempo de homogenización del coagulante	10 min
Tiempo de homogeneización del floculante	25 min
Tiempo de sedimentación	60 min
Tiempo de residencia	95 min

Para lograr que la operación unitaria tenga una acción efectiva al agitar y mezclar los reactivos con las aguas residuales, se propuso un tanque cilíndrico vertical con agitación para el diseño del tanque de coagulación y floculación. En la figura 14, se presenta un esquema estándar del equipo. Las dimensiones del tanque dependen de las condiciones de agitación, el tiempo de residencia y el caudal que ingresará al equipo. Una de las características del diseño es que el fondo del tanque es redondo, ya que elimina los contaminantes de las zonas que normalmente no serían alcanzadas en depósitos planos.

Otra cualidad del equipo es que la altura del fluido será equivalente al diámetro del recipiente. En la cima irá colocado un agitador, el cual se encenderá con un pequeño motor. Para llevar un control del sistema, los equipos también tienen instalados utensilios secundarios como: termopozos, termómetros, deflectores, encamisados y válvulas de entrada y salida (McCabe & Smith, 2007).

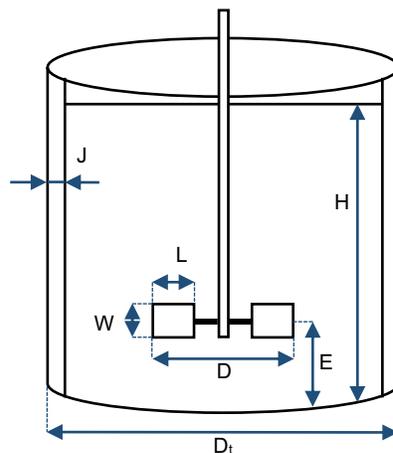


Figura 14. Esquema del tanque de coagulación y floculación con agitación

La figura 14 presenta un esquema estándar del tanque de coagulación y floculación con agitación, en el que los símbolos señalados junto a sus partes representan lo siguiente:

J = Ancho de los deflectores

H = Altura del fluido en el tanque

L = Longitud de la pala

W = Ancho del rotor

E = Altura del motor

D_a = Diámetro del motor

D_t = Diámetro del tanque

Para determinar el volumen del tanque se relaciona el caudal máximo experimental con el tiempo de residencia, empleando la ecuación 3.17.

$$V_{\max} = Q_{\max} * t_r \quad (3.17)$$

$$V_{\max} = 0.80 \frac{\text{L}}{\text{min}} * 95 \text{ min}$$

$$V_{\max} = 76 \text{ L}$$

Al ser un diseño basado en pruebas experimentales, se asume un porcentaje de amortiguación o error del 20% para el sistema, en el que se emplea la ecuación 3.18.

$$V_{\text{tanque}} = V_{\max} * \%_{\text{amortiguación}} \quad (3.18)$$

$$V_{\text{tanque}} = 76 \text{ L} * 1.20$$

$$V_{\text{tanque}} = 91.20 \text{ L}$$

Para un tanque cilíndrico con agitación, se emplean las siguientes ecuaciones de diseño para determinar el volumen, área, diámetro y radio:

$$\frac{H}{D_t} = 1 \quad (3.19)$$

$$V_{\text{tanque}} = \pi r^2 H \quad (3.20)$$

$$r = \frac{D_t}{2} \quad (3.21)$$

A partir de las ecuaciones 3.20 y 3.21 se obtiene la ecuación 3.22 al despejar el diámetro del tanque.

$$D_t = \sqrt[3]{\frac{4 * V_{\text{tanque}}}{\pi}} \quad (3.22)$$

$$D_t = \sqrt[3]{\frac{4 * 91.20 \text{ L} * \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ L}}}{\pi}}$$

$$D_t = 0.49 \text{ m}$$

De la misma manera, al despejar la ecuación 3.19, se obtiene que la altura del fluido es equivalente al diámetro del equipo (Ecuación 3.23).

$$H = D_t \quad (3.23)$$

$$H = 0.49 \text{ m}$$

Al reemplazar el diámetro del tanque en la ecuación 3.21, se obtiene el radio del equipo.

$$r = 0.24 \text{ m}$$

El área total del tanque cilíndrico es igual a la sumatoria del área lateral y de la base, en el que se emplea la ecuación 3.24.

$$A_{\text{tanque}} = 2\pi rH + 2\pi r^2 \quad (3.24)$$

$$A_{\text{tanque}} = 2\pi * 0.24\text{m} (0.49\text{m} + 0.24\text{m})$$

$$A_{\text{tanque}} = 1.10 \text{ m}^2$$

En la tabla 38 se presentan las dimensiones necesarias para el diseño del tanque de coagulación y floculación.

Tabla 38. Dimensiones del tanque de coagulación y floculación

Descripción	Simbología	Valor
Área del tanque	A_{tanque}	1.10 m ²
Volumen del tanque	V_{tanque}	0.091 m ³
Diámetro del tanque	D_t	0.49 m
Radio del tanque	r	0.24 m
Altura del fluido en el tanque	H	0.49 m

3.6.3.2 Dimensionamiento del agitador

Para diseñar un tanque cilíndrico con agitación se establece una insólita cifra de alternativas sobre el modelo y la ubicación del agitador, dimensiones del tanque, cantidad de equipos secundarios. Las distintas elecciones actúan sobre la velocidad de desplazamiento del fluido y energía consumida. Para agitadores de turbina, como la figura 14, las ecuaciones de relación proporcional estándar son las siguientes:

$$\frac{D_a}{D_t} = \frac{1}{3} \quad (3.25)$$

$$\frac{E}{D_t} = \frac{1}{3} \quad (3.26)$$

$$\frac{W}{D_a} = \frac{1}{5} \quad (3.27)$$

$$\frac{J}{D_t} = \frac{1}{12} \quad (3.28)$$

$$\frac{L}{D_a} = \frac{1}{4} \quad (3.29)$$

Despejando las ecuaciones se obtienen las dimensiones del agitador del tanque de coagulación y floculación como se muestra en la tabla 39.

Tabla 39. Dimensiones del sistema de agitación

Descripción	Simbología	Valor
Ancho de los deflectores	J	0.041 m
Longitud de la pala	L	0.040 m
Ancho del rotor	W	0.032 m
Altura del motor	E	0.16 m
Diámetro del motor	D _a	0.16 m

Para que el movimiento sea eficiente, el volumen de las aguas residuales tiene que lograr alcanzar las secciones más remotas del tanque, en las que la circulación del líquido determine la efectividad del procedimiento. Para interpretar la circulación del efluente se utilizó el Número de Reynolds (Ecuación 3.30).

$$Re = \frac{N * \rho * D_a^2}{\mu} \quad (3.30)$$

Donde,

Re = Número de Reynolds.

N = Velocidad de la agitación.

ρ = Densidad del agua.

D_a = Diámetro del motor

μ = Viscosidad del efluente.

Número de Reynolds para la velocidad de giro del coagulante:

$$Re = \frac{\left(200 \text{ rpm} * \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}}\right) * \left(1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) * (0.16 \text{ m})^2}{0.00105 \frac{\text{kg}}{\text{m} * \text{s}}}$$

$$Re = 81270$$

Número de Reynolds para la velocidad de giro del floculante:

$$Re = \frac{\left(100 \text{ rpm} * \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}}\right) * \left(1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) * (0.16 \text{ m})^2}{0.00105 \frac{\text{kg}}{\text{m} * \text{s}}}$$

$$Re = 40635$$

Para la velocidad de giro del coagulante se propone un valor de 200 rpm, mientras que para el floculante se considera 100 rpm, ya que la agitación tiene que ser menor para evitar que se destruyan los flóculos que se han ido formando en el proceso. Sin embargo, para realizar el diseño del sistema de agitación se empleará el valor mayor, debido a que la potencia del motor tiene que ser capaz de trabajar para ambas velocidades. Para hallar el valor de la potencia consumida por agitación se utilizó la ecuación 3.31.

$$P = N_p * \rho * N^3 * D_a^5 \quad (3.31)$$

Donde,

P = Potencia necesaria para la agitación.

N_p = Número de la potencia.

ρ = Densidad del agua.

N = Velocidad de agitación.

D_a = Diámetro del motor.

Potencia consumida para la velocidad de giro del coagulante:

$$P = 5 * \left(1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) * \left(200 \text{ rpm} * \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}}\right)^3 * (0.16 \text{ m})^5$$

$$P = 19.42 \text{ W} * \frac{1 \text{ HP}}{746 \text{ W}} = 0.02603 \text{ HP}$$

$$\frac{P}{V_{\text{tanque}}} = \frac{0.02603 \text{ HP}}{91.20 \text{ L}} = 2.86 \times 10^{-4} \frac{\text{HP}}{\text{L}}$$

Potencia consumida para la velocidad de giro del floculante:

$$P = 5 * \left(1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) * \left(100 \text{ rpm} * \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}}\right)^3 * (0.16 \text{ m})^5$$

$$P = 2.43 \text{ W} * \frac{1 \text{ HP}}{746 \text{ W}} = 3.25 \times 10^{-3} \text{ HP}$$

$$\frac{P}{V_{\text{tanque}}} = \frac{3.25 \times 10^{-3} \text{ HP}}{91.20 \text{ L}} = 3.57 \times 10^{-5} \frac{\text{HP}}{\text{L}}$$

Tabla 40. Principio de diseño para el grado de agitación (Vian, 2012)

Grado de giro	Potencia/Volumen [HP/L]
Débil	Hasta 1.30×10^{-4}
Medio	1.30×10^{-4} hasta 2.50×10^{-4}
Intenso	2.60×10^{-4} hasta 6.60×10^{-4}
Muy intenso	6.60×10^{-4} hacia adelante

Para la velocidad de giro del coagulante se necesita una potencia de 0.02603 HP, al relacionarla con el volumen del tanque, se obtuvo una proporción de 2.86×10^{-4} HP/L. De

acuerdo con la tabla 40, se requiere un grado de giro intenso durante la coagulación. Mientras que, para la floculación se obtuvo una potencia de 3.25×10^{-3} HP, que por el volumen del recipiente es 3.57×10^{-5} HP/L y según la misma tabla bibliográfica, se requiere un grado de agitación débil.

Tabla 41. Resultado de la potencia del coagulante y floculante

Descripción	Valor	Grado de agitación
Potencia del coagulante	2.60×10^{-2} HP	Intenso
Potencia del floculante	3.25×10^{-3} HP	Débil

En la tabla 41 se presentan los resultados de la potencia que debe existir para la velocidad de giro del coagulante y floculante.

3.6.4 Dimensionamiento de columna de intercambio iónico

Las columnas de intercambio iónico se emplean con un propósito similar al de los filtros de arena o de carbón activo; donde se realiza un intercambio entre los iones con el medio adsorbente, en este caso, las resinas. Para el diseño se emplean varios tipos de columnas, entre ellas, la más comúnmente usada es la columna de presión con regeneración en contracorriente. Es importante considerar que para que el proceso, el lecho debe estar compacto y distribuido uniformemente para que suceda el principio del intercambio y no debe de estar de forma fluidizada, eso solo es permitido durante la regeneración para poder remover todas las partículas de la superficie de la resina.

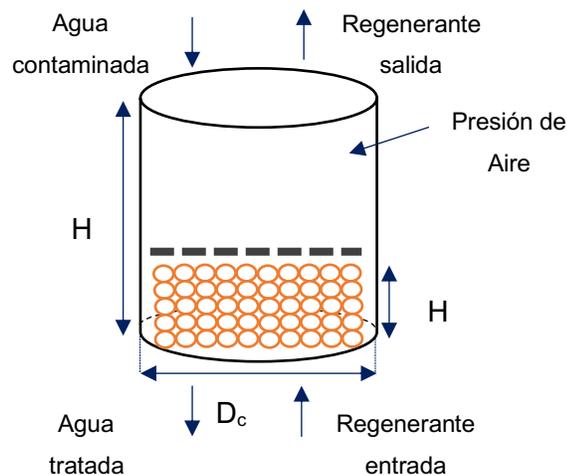


Figura 15. Esquema de columna de intercambio iónico

Para el dimensionamiento de la columna de intercambio iónico se utilizaron las propiedades fisicoquímicas de la resina empleada en la experimentación y la relación de altura-diámetro (H/D) de columna de cromatografía que se empleó en la experimentación.

Tabla 42. Características de diseño de la resina Lewatit A 365

Variable	Valor	Unidad
Densidad	1.1	g/mL
Capacidad de intercambio	3.4	eq/L
Variación de volumen	25	%
Concentración de Regenerante	5	%

Tabla 43. Variables de diseño de la columna del intercambio iónico

Caudal de tratamiento [m ³ /h]	0.048
Relación h/d	4.00
Conductividad Inicial [μS/cm]	2245
Conductividad final [μS/cm]	369.64
Tiempo de operación [min]	60.00
Ciclo de regeneración [h/ciclo]	4.00
Concentración de cloruros [eq/L]	0.049

Diseño de unidad de intercambio iónico

1. Carga iónica

$$\text{Carga iónica} \rightarrow [C_i] = C_{Cl} * Q_D * C_R$$

$$[C_i] = 0.049 \frac{\text{eq}}{\text{L}} * 0.048 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} * 4 \frac{\text{h}}{\text{ciclo}} * 1000 \frac{\text{L}}{\text{m}^3}$$

$$[C_i] = 2.17 \frac{\text{eq}}{\text{ciclo}}$$

2. Volumen necesario de resina

$$\text{Volumen de Resina} \rightarrow [\text{VRC}] = \frac{(C_{Cl})(Q_D)(C_r)}{(C_{EX})}$$

$$[\text{VRC}] = \frac{\left(0.049 \frac{\text{eq}}{\text{L}}\right) \left(0.048 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}\right) \left(\frac{4\text{h}}{\text{ciclo}}\right)}{\left(3.4 \frac{\text{eq}}{\text{L}}\right)}$$

$$[\text{VRC}] = 0.028 \frac{\text{m}^3}{\text{ciclo}}$$

$$[\text{VRC}] = 27.67 \text{ L}$$

3. Capacidad instalada

$$\text{Capacidad instalada} \rightarrow [\text{C}_{\text{ins}}] = \text{VRC} * \text{CRC}$$

$$[\text{C}_{\text{ins}}] = 27.67 \text{ L} * 3.4 \frac{\text{eq}}{\text{L}} = 94.08 \frac{\text{eq}}{\text{ciclo}}$$

4. Dimensionamiento de la columna

$$\text{Volumen equipo} \rightarrow [\text{V}_{\text{Eq}}] = Q * T_{\text{op}}$$

$$[\text{V}_{\text{Eq}}] = 0.048 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} * 60 \text{ min} * \frac{1\text{h}}{60 \text{ min}}$$

$$[\text{V}_{\text{Eq}}] = 0.048 \text{ m}^3$$

$$\text{Diámetro de la columna} \rightarrow [\text{D}_{\text{Col}}] = \sqrt[3]{\frac{4 (\text{V}_{\text{Eq}})}{(4)\pi}}$$

$$[\text{D}_{\text{Col}}] = \sqrt[3]{\frac{4 (0.048 \text{ m}^3)}{4 \pi}} = 0.248 \text{ m}$$

$$\text{Área de la base columna} \rightarrow [\text{A}_{\text{Col}}] = \frac{\pi}{4} \text{D}_{\text{col}}^2$$

$$[\text{A}_{\text{Col}}] = \frac{\pi}{4} (0.248 \text{ m})^2$$

$$[\text{A}_{\text{Col}}] = 0.048 \text{ m}^2$$

$$\text{Altura de la columna} \rightarrow [\text{H}_{\text{Col}}] = \frac{4 * \text{V}_{\text{Eq}}}{\pi [\text{D}_{\text{col}}^2]}$$

$$[\text{H}_{\text{Col}}] = \frac{4 * (0.048 \text{ m}^3)}{\pi * (0.248 \text{ m})^2}$$

$$[\text{H}_{\text{Col}}] = 0.993 \text{ m} \approx 1 \text{ m}$$

$$\text{Altura del lecho} \rightarrow [\text{H}_{\text{L1}}] = \frac{\text{VRC}}{\text{A}_{\text{col}}}$$

$$[H_{L1}] = \frac{0.028 \text{ m}^3}{0.048 \text{ m}^2}$$

$$[H_{L1}] = 0.572 \text{ m}$$

Altura de expansión → $[H_{L,ex}] = H_{L1} * \% \text{expansión}$

$$[H_{L,ex}] = 0.572 \text{ m} * 0.25$$

$$[H_{L,ex}] = 0.143 \text{ m}$$

Altura total de lecho → $[H_L] = H_{L1} + H_{L,ex}$

$$[H_L] = 0.572 \text{ m} + 0.143 \text{ m}$$

$$[H_L] = 0.715 \text{ m}$$

Volumen del lecho → $[V_L] = H_{L1} * A_{Col}$

$$[V_L] = 0.572 \text{ m} * 0.048 \text{ m}^2$$

$$[V_L] = 0.028 \text{ m}^3$$

5. Proceso de regeneración

Masa de Regenerante → $[m_{NaOH}] = VRC * \text{Cantidad de regenerante}$

$$[m_{NaOH}] = 27.67 \frac{\text{L}}{\text{ciclo}} * 100 \frac{\text{g}}{\text{L}}$$

$$[m_{NaOH}] = 2767 \frac{\text{g}}{\text{ciclo}} = 2.767 \text{ Kg}$$

Masa de Agua → $[m_{H_2O}] = \left(m_{NaOH} * \frac{100}{\% \text{Concentración}} \right) - m_{NaOH}$

$$[m_{H_2O}] = \left(2.767 \text{ Kg} * \frac{100}{5} \right) - 2.767 \text{ Kg}$$

$$[m_{H_2O}] = 52.573 \text{ Kg}$$

Masa de solución → $[m_{sol}] = m_{NaOH} + m_{H_2O}$

$$[m_{sol}] = 2.767 \text{ Kg} + 52.573 \text{ Kg}$$

$$[m_{sol}] = 55.34 \text{ Kg}$$

Volumen del regenerante → $[V_{REG}] = \frac{m_{sol}}{\rho_{sol}}$

$$[V_{REG}] = \frac{55.34 \text{ Kg}}{2044.91 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}}$$

$$[V_{REG}] = 0.027 \text{ m}^3$$

$$\text{Tasa de Regeneración} \rightarrow [T_{\text{Reg}}] = \frac{m_{\text{NaOH}} [\text{eq}]}{C_i [\text{eq}]}$$

$$[T_{\text{Reg}}] = \frac{2.767 [\text{eq}]}{2.17 [\text{eq}]}$$

$$[T_{\text{Reg}}] = 1.28 \rightarrow 128\%$$

$$\% \text{Exceso} \rightarrow [\%E_x] = 100 * (\text{tasa de regeneración} - 1)$$

$$[\%E_x] = 100 * (1.28 - 1)$$

$$[\%E_x] = 28.04\%$$

$$\% \text{Rendimiento} \rightarrow [\%R_x] = 100 \times \left(\frac{\text{carga iónica} [\text{eq}]}{\text{regenerante} [\text{eq}]} \right)$$

$$[\%R_x] = 100 * \left(\frac{2.17}{2.767} \right)$$

$$[\%R_x] = 78.10 \%$$

Tabla 44. Resultados del diseño de la columna de intercambio iónico

Variable	Unidad	Valor
Altura de la columna	m	1.00
Diámetro de la columna	m	0.248
Volumen del equipo	m ³	0.048
Altura total del lecho	m	0.715
Volumen del lecho	m ³	0.028
Volumen del regenerante	m ³	0.027

3.7 Análisis de resultados

El proceso que se llevó a cabo experimentalmente para la remoción de sólidos fue el sistema de coagulación y floculación donde se realizó los diferentes ensayos en un sistema de pruebas de jarras. Como se observa en la tabla 8, los valores de la concentración de sólidos del efluente están fuera de la Normativa de Descarga de Efluentes al sistema de alcantarillado público, cuya restricción tiene un límite de 1600 mg/L. En la tabla 16, se muestran los parámetros de control: dureza total, turbidez y concentración de SST, antes de realizar la experimentación.

Para determinar la dosificación adecuada de coagulante y floculante que requiere el sistema, se realizaron 25 ensayos, ya que se tienen dos compuestos distintos y se tiene que probar con cada una de las combinaciones posibles para las muestras propuestas. El tratamiento fisicoquímico de coagulación y floculación tiene como principal objetivo alterar el estado físico del agua residual al agregar primero el coagulante y luego el floculante, ya que los contaminantes serán separados del efluente por medio de la sedimentación. Por ello, mediante la experimentación se halló la combinación específica para la cantidad de contaminantes que poseen los efluentes estudiados.

Las tablas 20, 21 y 22 presentan los resultados finales de los ensayos realizados en las pruebas de jarras con respecto a las variables objetivo (dureza, turbidez y sólidos suspendidos totales). Dichas variables fueron tomadas como referencia, debido a que el proceso de coagulación y floculación mejora la calidad del agua; por lo tanto, se reduce la turbidez, se disminuyen los altos niveles de minerales presentes en los fluidos y los sólidos son separados por flotación o sedimentación.

Entre los resultados iniciales y finales de las muestras para las variables objetivo, se observa una diferencia representativa, ya que, al aumentar la dosificación de coagulante y floculante, la claridad del agua incrementa, obteniendo mejores resultados para el sistema. Así que, entre menor sean los valores obtenidos en los parámetros analizados, mayor será el porcentaje de remoción de los contaminantes críticos en los efluentes.

Las tablas 23, 24 y 25 exponen los resultados del porcentaje de remoción de contaminantes para cada uno de los ensayos elaborados. En todas las pruebas realizadas, se observó que en la combinación de 200 ppm de floculante y 500 ppm de coagulante, existe el mayor porcentaje de remoción. Para el primer ensayo, a dicha combinación se obtuvo un porcentaje de disminución del 87.91% para sólidos suspendidos totales (SST), 54.58% para dureza total y 83.33% para turbidez. En el segundo ensayo, se obtuvo un porcentaje de reducción del 91.19% para SST, 63.64% para dureza y 79.60% para turbidez.

Por último, para el tercer ensayo, se obtuvo una disminución de 89.38% para SST, 68.03% para dureza y 82.11% para turbidez.

El propósito de utilizar un coagulante y floculante es eliminar de una manera más efectiva y rápida los sólidos totales presentes en las aguas residuales, lo cual hace práctico el análisis inicial y final de estos. Otra característica de este método es que se mejora la claridad del efluente al reducir su turbidez, ya que, al agregar los químicos pertinentes, las partículas contaminantes se floculan y quedan en el fondo del tanque en el que se esté realizando el procedimiento, y mediante la filtración se eliminan del sistema, generando una mejor calidad del fluido. Por tanto, entre mayor sea el porcentaje de remoción de estos parámetros, mayor será la veracidad de la combinación obtenida en la experimentación.

En cuanto a la dureza, es la sumatoria de los iones presentes en las aguas y como se pudo observar en los ensayos, los porcentajes para este parámetro no son tan altos, ya que el método aplicado no está diseñado para eliminar las sales de los iones en su totalidad. Sin embargo, el porcentaje de remoción obtenido está alrededor del 60%, lo cual lo hace un valor aceptable para la experimentación realizada.

Adicionalmente, para una mejor apreciación de los resultados se realizaron las gráficas 2, 3 y 4, que presentan la variación de los parámetros objetivos en función de la concentración del coagulante y floculante. Se observó una gran variabilidad en los datos, ya que a medida que aumenta la concentración del floculante, aumenta la del coagulante. Pero, significativamente se observa un pico en cada uno de los casos, a una combinación de 500 ppm de policloruro de aluminio y 200 ppm de poliacrilamida.

Para la disminución de cloruros, se llevó a cabo una cromatografía de iones a escala de laboratorio simulando el sistema de intercambio aniónico y se empleó las 3 muestras utilizadas en el sistema de floculación y coagulación. La tabla 28 detalla la concentración inicial y final de cloruros en cada muestra, donde se observó que la concentración inicial de las muestras sobrepasa el límite permisible de cloruros disueltos en el agua, cuya restricción

tiene un valor de 10 meq/L. El volumen experimental de la columna de cromatografía es de 220 mL, por lo que se procedió a realizar 5 ensayos con un volumen de 200 mL.

En la experimentación, se controló dos parámetros de calidad del agua, la conductividad y el pH. En aguas con presencia de iones, la conductividad resulta útil para el control del proceso, dado que a medida que aumente la conductividad implica que existe una mayor contaminación en el agua. Los resultados presentados en la tabla 29 detallan la variación de los parámetros medidos para cada uno de los distintos ensayos realizados en cada muestra.

El relleno que se empleó en la columna es la resina aniónica, la cual está formada por polímeros entrecruzados que poseen sus grupos funcionales en los extremos para poder realizar el intercambio y adsorber los cloruros. Se colocó la resina de forma compacta y en distribuida uniformemente para que el intercambio se dé de forma más eficiente y evitando que existan espacios amorfos que resten precisión y no permitan que se llegue al equilibrio.

En la muestra 1 se observa una diferencia representativa en los valores de conductividad inicial y final, donde se reduce este parámetro en un 82% por medio del intercambio. El pH también aumenta al final del proceso, obteniendo un agua más básica que la inicial, lo cual se da debido a que la resina intercambia su grupo básico con el agua para reemplazar los cloruros. En las muestras 2 y 3 también se observan variaciones en los valores de conductividad con un porcentaje de remoción aproximadamente del 84% para ambos casos.

La capacidad de intercambio útil de la resina se establece en un ciclo de 4 horas para llegar a su saturación por las propiedades fisicoquímicas que presenta el relleno comercial, manteniendo así un porcentaje alto de remoción y eliminando la mayor cantidad de contaminantes del agua. Se puede apreciar en la figura 7, que existe una oscilación en los resultados de la conductividad final entre cada ensayo de cada muestra que son producidos por errores de medición tales como la precisión teórica del conductímetro en la lectura de

los datos y la tolerancia del aparato para cada medición. Sin embargo, la dispersión de los datos no es tan significativa, por lo que, se mantiene una remoción constante de cloruros.

Para diseñar un tanque de coagulación y floculación se debe tener en cuenta varios factores como: la caracterización inicial de los efluentes a tratar, el caudal de diseño, la calidad del agua a la que se quiere llegar, el tiempo de operación y la dosificación necesaria de coagulante y floculante. En la tabla 38 se presentan los resultados del dimensionamiento del tanque, se obtuvo un valor de 1.10 m^2 para el área, con un volumen de 0.091 m^3 , mientras que, para el diámetro del equipo y la altura del fluido se obtuvo 0.49 m . Del mismo modo, para que se genere la coagulación y floculación, los reactivos tienen que mantenerse en agitación constante. Así que, se diseñó un agitador para el tanque propuesto y en la tabla 39 se muestran los resultados del dimensionamiento, en el que el ancho de los deflectores es 0.041 m , la longitud de la pala es 0.040 m , el ancho del rotor es 0.032 m y la altura y diámetro del motor es 0.16 m . A su vez, en la tabla 41 se presenta que el coagulante requiere una agitación intensa para formar los sedimentos en el efluente a una potencia de $2.60 \times 10^{-2} \text{ HP}$ y el floculante necesita una agitación débil a $3.25 \times 10^{-3} \text{ HP}$.

Para el diseño óptimo de una columna de intercambio iónico, se debe tomar en cuenta varios factores como: el análisis característico del agua residual que se va a tratar, el caudal de tratamiento que se emplea, la calidad del agua que se desea, la duración del ciclo de regeneración y la capacidad de intercambio de cada resina. Además, para realizar un escalamiento es importante considerar el factor de relación altura-diámetro (H/D) experimental, que permitirá determinar sus dimensiones a una escala mayor.

En la tabla 44, se describen los resultados de las dimensiones obtenidas en la columna, para la altura de la columna se obtuvo un valor de 1 m con un diámetro de 24.8 m , mientras que para la altura del lecho se considera un alto de 71.5 cm . Los valores fueron determinados en base al caudal de tratamiento de $0.048 \text{ m}^3/\text{h}$, el cual no es un valor tan alto, por lo que es coherente que el tamaño de la columna no sea muy grande. El

dimensionamiento de la columna se lo lleva a cabo con las ecuaciones de área y volumen de un cilindro, el cual es la forma geométrica más representativa de este equipo.

3.8 Análisis económico

Basado en los datos obtenidos en la parte experimental del proyecto, se procedió a determinar los costos de inversión y los gastos operativos del sistema de tratamiento de aguas residuales propuesto. Además, se realizó un análisis de costos con la intención de poder evaluar la rentabilidad del sistema de saneamiento propuesto.

3.8.1 Análisis de costos de los reactivos

En esta sección, se calculó los costos de la materia prima de cada proceso industrial del sistema de tratamiento en base a su respectiva dosificación. Los precios fueron obtenidos de las cotizaciones realizadas en distribuidoras de productos químicos del mercado ecuatoriano (Health & Life S.A., 2022).

Tabla 45 Costos de materia prima del sistema de tratamiento

Proceso 1	Floculación - Coagulación		
Materia Prima	Precio [USD/Kg]	Dosificación [Kg/L]	Costo por litro [USD/L]
Poliacrilamida (Floculante)	\$2	0.0002	\$0.0003
Policloruro de Aluminio (Coagulante)	\$1	0.0005	\$0.001
Proceso 2	Intercambio Iónico		
Materia Prima	Precio [USD/Kg]	Dosificación [Kg/L]	Costo por litro [USD/L]
Resina aniónica (Lewatit A 365)	\$1.6	0.063	\$0.10
Hidróxido de sodio (NaOH 5%)	\$0.45	0.1	\$0.05

En la tabla 45 se presentan los resultados del costo por litro de cada materia prima empleada en los procesos de tratamiento, donde se observó que la relación de precios del intercambio ionio es mucho más costosa que la del sistema de floculación y coagulación.

Cabe recalcar que los valores de las dosificaciones para el coagulante y floculante no son tan altos debido al caudal de tratamiento de diseño y además el volumen máximo del equipo.

Tabla 46 Costos de operación del sistema de tratamiento de aguas

Rubro	Costo por metro cúbico [USD/m ³]	Costo mensual [USD/mes]
Productos químicos para proceso 1	\$0.80	\$2.15
Productos químicos para proceso 2	\$203.33	\$546.56
Costos totales	\$204.13	\$548.71

En la tabla 46, se detalló los rubros de cada proceso, los costos se describieron por metro cúbico de agua a tratar y mensualmente. Por medio de estos cálculos, el costo total de materia prima por ambos procesos es un valor de \$548.71 mensuales.

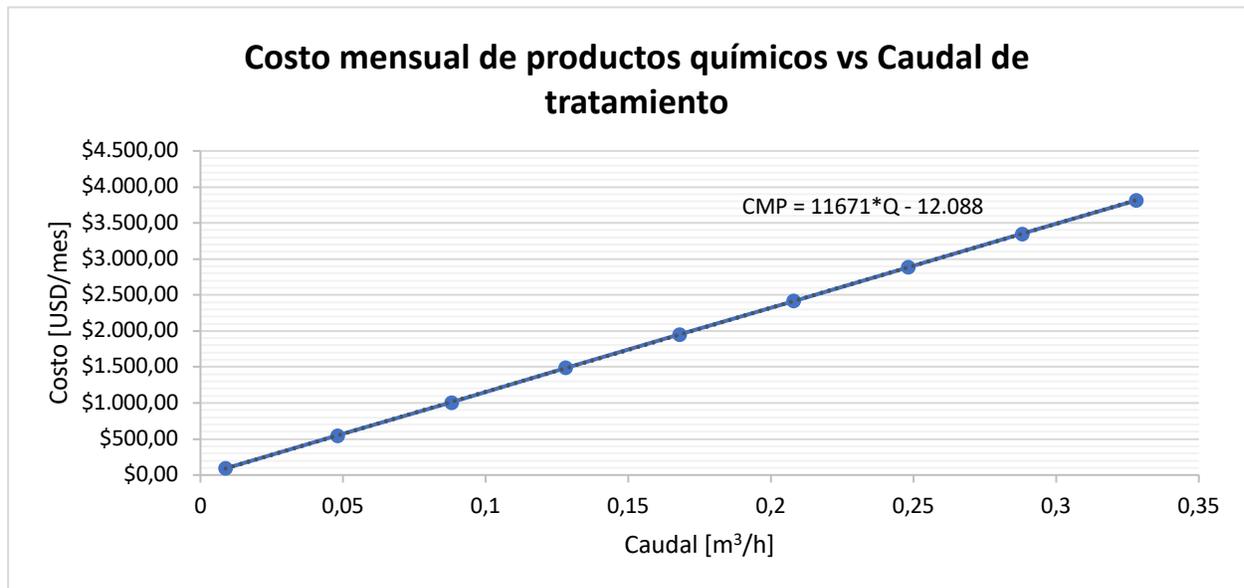


Figura 16. Relación del costo mensual de materia prima con el caudal de tratamiento

En la figura 16, se puede apreciar la relación que existe entre el caudal y el costo mensual de los productos químicos, la cual se da de forma lineal y creciente; es decir que, a medida que el valor del caudal aumenta, el precio se incrementa de igual manera. Para un caudal de 0.35 m³/h, el precio de la materia prima aumenta a \$4001.10, por lo que al ser más volumen de agua a tratar implica un aumento en gastos y servicios.

3.8.2 Análisis de costo capital de inversión

En esta sección, se realizarán estimaciones de costo, lo que permitió obtener el costo capital de inversión de este manejo de aguas residuales. Para aquello, se emplearon los porcentajes de estos factores de costos directos e indirectos tomados de literatura para la estimación de costos de procesos generales de plantas (Bole, 2015). Se estimó que es costo total de inversión para este proyecto es de \$2702.84.

Tabla 47. Estimación del costo de capital de inversión

Estimación del costo de capital de inversión		
COSTOS DIRECTOS	%	VALOR
Costo total de equipos	15	\$ 1950.10
Equipos		Costo [USD]
Tanque de almacenamiento de polietileno		\$355.30
Trampa de grasas		\$150.00
Tanque para coagulación y floculación		\$619.80
Columna de intercambio		\$705.00
Bombas y equipos aledaños		\$120.00
Costo de instalación de equipos	6	\$117.01
Costo de tuberías	3	\$58.50
Costo de controles e instrumentación	2	\$39.00
Costos totales directos [USD]		\$2164.61
COSTOS INDIRECTOS	%	VALOR
Costo del diseño y construcción	10	\$195.01
Costo de contingencia	5	\$97.51
Costos totales indirectos [USD]		\$292.52
Costo fijo de capital [USD]		\$2457.13
Costo neto de trabajo capital [USD]		\$245.71
Costo capital de inversión [USD]		\$2702.84

3.8.3 Análisis del costo anual de operación de la planta

El costo total anual de operación de la planta se lo determinó con el uso de los factores de estimación del libro Smith (Smith, 2016), en donde se obtuvo un costo anual total de \$7176.72 el cual es calculado conociendo su costo total de capital de inversión primero (TIC). En los costos variables, los costos de utilidades se basaron en el costo de electricidad, el cual representará las bombas del sistema. Al laboratorio trabajar con un caudal pequeño, por consiguiente, las bombas no tendrán una potencia tan alta y suelen ser de bajo consumo energético. El rubro de electricidad estimado es de \$213.12 y de la materia prima para un año es de \$6584.52, el cual fue estimado en la tabla 45.

Tabla 48. Costo total anual del sistema de tratamiento

COSTOS FIJOS		[USD]
Rutina de Mantenimiento	5% TIC	\$135.14
Costo de supervisión operacional	2% TIC	\$54.06
Costo de mano de obra operativa	3.4% TIC	\$90.55
Impuestos locales	5% TIC	\$54.06
Costo de manufactura de la planta	50% Costo de mano de obra	\$45.27
COSTOS TOTALES FIJOS		\$ 379.07
COSTOS VARIABLES		[USD]
Materia Prima	Estimado	\$6,584.52
Electricidad	Estimado	\$213.12
COSTOS TOTALES VARIABLES		\$ 6 797.64
COSTO TOTAL ANUAL (TAC)		\$ 7176.72

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

Se propuso un sistema de tratamiento fisicoquímico basado en la caracterización inicial de las aguas residuales que posee el centro de análisis ambiental, donde se determinó los parámetros críticos que en este caso fueron los sólidos totales y cloruros. El sistema propuesto cuenta con diversas operaciones unitarias para el tratamiento, empezando por un tanque de almacenamiento, una trampa de grasas, un sistema de floculación y coagulación, una columna de intercambio iónico y un equipo de separación.

Se determinó de forma experimental mediante las pruebas de jarras las condiciones óptimas del tratamiento fisicoquímico de floculación-coagulación en tres muestras diferentes del efluente. Donde se obtuvo una mayor remoción de contaminantes sólidos al emplear la combinación entre floculante a 200 ppm y coagulante a 500 ppm, basado en 75 ensayos realizados, controlando los parámetros de calidad como: dureza total, turbidez y concentración de SST. En esta combinación, se logró la mayor disminución de las variables de control, obteniendo porcentajes de remoción superiores al 80%.

Se probó en nuevas muestras de efluentes la combinación propuesta de floculante y coagulante para la validación del método realizado en las pruebas de jarras y se obtuvieron resultados mayores al 80% de remoción de contaminantes, lo cual de acuerdo con “La Universidad Pedagógica de Durango”, los valores obtenidos son muy aceptables para valorar el coeficiente de confiabilidad de un procedimiento (Barraza, 2007).

Se empleó como floculante a la Poliacrilamida en solución al 1% y como coagulante al policloruro de aluminio en solución al 1%. La elección de esta materia prima se debe a que el policloruro de aluminio es recomendado como coagulante debido a que es un polielectrolito catiónico que neutraliza directamente los coloides negativos reduciendo la contaminación del agua de manera eficiente, y se debe considerar que el floculante ayude

y aporte a la coagulación, por lo que, se eligió a la poliacrilamida por su afinidad con el coagulante, además de que los polímeros son los que mejores dan resultados en remoción para este proceso.

Se empleó un tratamiento fisicoquímico de intercambio iónico con resina aniónica para la eliminación de los cloruros presentes en los efluentes. En donde se tomó como variables de control la medición del pH y la conductividad de las muestras durante la experimentación. Se obtuvo una disminución en la concentración de cloruros promedio del 83.34% en los 15 ensayos realizados, cumpliendo con la disminución del contaminante, ya que logra que la concentración final sea menor a 10 meq/L.

Se realizó el dimensionamiento de los equipos propuestos en base a los ensayos realizados. El sistema se adecuó al caudal del efluente proveniente del centro de análisis ambiental, obtenido un valor promedio experimental de 0.76 L/min con una desviación estándar de 0.019 L/min, al ser un valor muy bajo, representa que no existe mucha variabilidad en el procedimiento que se empleó. Sin embargo, para obtener mejores resultados en el dimensionamiento se trabajó con el caudal máximo experimental que es 0.80 L/min.

Se diseñó el tanque de almacenamiento con las ecuaciones de diseño, donde se obtuvo un tiempo de retención de 660 minutos, y en el cual sus dimensiones fueron 4.26 m² para el área del tanque, 0.66 m³ del volumen, 1.06 m de diámetro, 0.53 m de radio y 0.75 m de altura.

Se diseñó la trampa de grasas para separar los sólidos suspendidos y grasas de los efluentes. Se aplicó un tiempo de residencia de 3 minutos dado a que el caudal es pequeño y se obtuvieron los siguientes resultados para el dimensionamiento: 0.033 m² para el área del equipo, 0.024 m³ del volumen, 0.36 m de ancho, 0.091 m de largo y 0.73 m de altura.

Se determinó el grado de agitación para el tanque de coagulación y floculación el cual requiere una agitación débil cuando se aplique el floculante con una potencia de 3.25×10^{-3} HP y para el coagulante una agitación intensa con potencia de 2.60×10^{-2} HP.

Se optó por un tanque cilíndrico para el dimensionamiento de la columna de intercambio que por la distribución uniforme del espacio del relleno. Las dimensiones de esta columna fueron determinadas en base al caudal de tratamiento del efluente, el factor de altura-diámetro de la columna empleada en el laboratorio y al contenido de cloruros promedio del efluente, por lo que se obtuvo como resultados, la altura de la columna de 1 m con un diámetro de 0.248 m y un volumen de 0.048 m^3 .

Se obtuvo como resultados de la columna de intercambio para el diseño del lecho mediante las ecuaciones de diseño, una altura de 0.715 m considerando un porcentaje de expansión de volumen del 25% y un volumen de la resina de 0.028 m^3 y un volumen del regenerante de 0.027 m^3 con un rendimiento del 78.10%.

Al finalizar la experimentación, se realizó una caracterización en cada una de las muestras de aguas residuales, obteniendo una reducción del 95% en los parámetros críticos del sistema. Por lo tanto, se logró el cumplimiento de la Normativa de descarga de efluentes al alcantarillado público.

Mediante el análisis económico realizado, se determinó los costos de materia prima del sistema de tratamiento de aguas, donde se obtuvo un valor de \$204.13 por m^3 de agua a tratar y un costo mensual de \$548.71 en insumos. El costo de capital de inversión del sistema es un valor estimado de \$2702.84. Las sanciones por incumplimiento de las normativas ambientales pueden oscilar entre un valor de 10 a 20 salarios unificados dependiendo de la infracción (Gobierno del Ecuador, 2015). Por lo tanto, el diseño propuesto resulta factible y conveniente para la empresa, ahorrándole hasta un 65% en comparación a lo que le resultaría pagar una multa por incumplimiento de normativa.

4.2 Recomendaciones

Durante la experimentación de las pruebas de jarras, se recomienda utilizar otro coagulante y floculante como el sulfato de aluminio tipo B en combinación con la sílice activada, ya que eso permitirá obtener alternativas de resultados en referencia a los porcentajes de remoción de los contaminantes y tener un mejor criterio acorde a la experimentación.

Para el diseño del tanque de almacenamiento de coagulación y floculación, se recomienda realizar el dimensionamiento en un recipiente rectangular, ya que permitirá efectuar un mejor análisis de resultados al comparar la magnitud de ambos equipos.

Durante el tratamiento de aguas residuales, en el proceso de coagulación-floculación se forman lodos y aunque la combinación de reactivos elegida para el proceso genera la menor cantidad de residuos, se tiene que dar una solución, ya que la acumulación de lodos o el desecho de estos puede generar un gran impacto ambiental. Así que, se recomienda realizar un tratamiento de lodos como desecación y aprovecharlos, ya que sirven como fuentes de energía calorífica o eléctrica que se puede formar biogás durante una digestión anaeróbica. Caso contrario, si la cantidad de lodos es pequeña, el cliente puede optar por contratar un servicio de remoción y eliminación de estos.

El diseño del sistema de tratamiento de aguas residuales se planteó por operación unitaria, por lo que se recomienda hacer la proyección completa del proceso y realizar una comparación entre las dimensiones de los equipos y la capital de inversión de la planta.

Para la eliminación de malos olores que se pueden producir, se recomienda el uso de bombas de aireación. Las cuales se pueden instalar en el tanque de almacenamiento y en el tanque de floculación-coagulación; ya que el agua al contacto con el aire elimina en cierto porcentaje la materia biológica presente, además esto podría tener un efecto rebote en la disminución de los demás contaminantes.

Como instrumento imprescindible para la implementación del sistema de tratamiento de aguas residuales, se recomienda realizar una valoración del impacto ambiental, puesto que, la empresa podrá tener conocimiento sobre la repercusión que el diseño tendrá social, económica y ambientalmente para el concejo municipal.

BIBLIOGRAFÍA

- World Water Assessment Programme. (2003). Water for People Water for Life. In W. W. Programme, *The United Nations World Water Development Report* (pp. 5-33). New York: Unesco Publishing.
- Naciones Unidas CEPAL. (2019). Construir un futuro mejor Acciones para fortalecer la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. In N. U. CEPAL, *Cuarto informe sobre el progreso y los desafíos regionales de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible en América Latina y el Caribe* (pp. 91-125). Santiago: Naciones Unidas.
- Tapia, L. (2015). Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente: Norma de Calidad Ambiental y de Descarga de Efluentes al recurso agua. In L. Tapia, *Norma de Calidad Ambiental y de Descarga de Efluentes: Recurso Agua. Registro Oficial - Edición Especial No 387* (p. 20). Quito: Libro VI del Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundaria.
- Campos, H. (1996). Estimation of domestic wastewater characteristics in a developing country based on socio-economic variables. In H. Campos. *Water Science and Technology* Volume 34, Issues 3–4.
- Naciones Unidas Ecuador. (2022, Febrero). *Historias y Recursos*. Retrieved from Naciones Unidas Ecuador: <https://ecuador.un.org/>
- FUNIBER. (1997). Criterios de selección de los tratamientos de depuración. In F. U. Iberoamericana, *Instalaciones y Tratamiento del agua* (p. 13). Guayaquil: Ediciones FUNIBER.
- Hickner, M. (2013). Anion exchange membranes: Current status and moving forward. *Journal of Polymer Science* , 1727-1735. DOI:10.1002/polb.23395.
- Flamminii, F. (2021). Applications of compounds recovered from olive mill waste. *Food Waste Recovery Processing Technologies - Second Edition*, 327-353. DOI:10.1016/B978-0-12-820563-1.00006-8.
- Shammas, N. (2005). Coagulation and Flocculation. *Handbook of Environmental Engineering*, vol 3, 103–139. DOI:10.1385/1-59259-820-x:103.
- Miyata, S. (1983). Anion-Exchange Properties of Hydrotalcite-Like Compounds. *Clays and Clay Minerals*, vol 31, 305–311. DOI:10.1346/CCMN.1983.0310409.

- Manios, T., & Stentiford, E. I. (2011). Removal of Total Suspended Solids from Wastewater in Constructed Horizontal Flow Subsurface Wetlands. *Journal of Environmental Science and Health*, vol 38, Issue 6, 1073-1085. DOI:10.1081/ESE-120019865.
- Bustillo, C. (2015). Slaughterhouse wastewater characteristics, treatment, and management in the meat processing industry: A review on trends and advances. *Journal of Environmental Management*, vol 161, 287-302. DOI:10.1016/j.jenvman.2015.07.008.
- Aloui, F. (2009). Physicochemical treatments of anionic surfactants wastewater: Effect on aerobic biodegradability. *Journal of Hazardous Materials*, vol 164, Issue 1, 353-359. DOI:10.1016/j.jhazmat.2008.08.009.
- Vlyssides, A. (2005). Wastewater characteristics from Greek wineries and distilleries. *Water Science & Technology*, vol 51, Issue 1, 53-60. DOI:10.2166/wst.2005.0007.
- Reddy, K. (1997). Biogeochemical indicators to evaluate pollutants removal efficiency in constructed wetlands. *Water Science & Technology*, vol 35, Issue 10, 1–10. DOI:0.1016/S0273-1223(97)00046-2.
- Eriksson, E. (2002). Characteristics of grey wastewater. *Urban Water*, vol 4, Issue 1, 85-104. DOI:10.1016/S1462-0758(01)00064-4.
- Muttamara, S. (1996). Wastewater characteristics. *Resources, Conservation and Recycling*, vol 16, Issues 1–4, 145-159. DOI:10.1016/0921-3449(95)00052-6.
- Leonhauser, H., & Pawar, J. (2014). Novel Technologies for the Elimination of Pollutants and Hazardous Substances in the Chemical and Pharmaceutical Industries. *Industrial Wastewater Treatment, Recycling and Reuse*, 215-234. DOI:10.1016/B978-0-08-099968-5.00005-2.
- Cisneros, B. (2011). Safe Sanitation in Low Economic Development Areas. *Treatise on Water Science*, vol 4, 147-200. DOI:10.1016/B978-0-444-53199-5.00082-8.
- Crini, G., & Lichtfouse, E. (2019). Advantages and disadvantages of techniques used for wastewater treatment. *Environmental Chemistry Letters*, vol 17, 145–155. DOI:10.1007/s10311-018-0785-9.
- Machado, J. (2020). *Programa para la descontaminación de los ríos de Quito*. Retrieved from EPMAPS - Agua de Quito: <https://www.aguaquito.gob.ec>

- Toranzos, M. (2019, Diciembre 16). *El 53 % del agua de riego en Guayas está contaminada*. Retrieved from EXPRESO: <https://www.expreso.ec/guayaquil/agua-riego-contaminada-guayas-1498.html>
- Gobierno de la República del Ecuador. (2021). Agencia de Aseguramiento de la Calidad de los Servicios de salud y medicina prepagada. *Plataforma Gubernamental de Desarrollo Social*, 1-4.
- Acciona. (2020). *Tratamiento del agua: La solución al problema del agua del mundo*. Retrieved from Acciona - Business as Unusual: www.acciona.com
- SAE. (2018). Alcance de Acreditación para los Laboratorios de Ensayo. *Servicio de Acreditación Ecuatoriano SAE LEN 18-019, Expediente No. OAE LE 13-003, Revisión No. 7*, 1-11.
- Aguilar, M., & Sáez, J. (2002). Principales coagulantes y floculantes. In M. Aguilar, & J. Sáez, *Tratamiento físico-químico de aguas residuales: coagulación-floculación 1era Edición* (pp. 45-59). España: Universidad de Murcia.
- Instituto Ecuatoriano de Normalización. (1998). Agua, Calidad del Agua, Muestreo, manejo y conservación de muestras. *Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2169:98 Primera Edición*, 1-21.
- Tchobanoglous, G., & Burton, F. (2003). Wastewater Engineering. In G. Tchobanoglous, & F. Burton, *Wastewater Engineering Treatment and Reuse Fourth Edition* (pp. 10-24). New York: McGraw Hill Education.
- McCabe, W., & Smith, J. (2007). Tanque de agitación. In W. McCabe, & J. Smith, *Operaciones Unitarias en Ingeniería Química Séptima Edición* (pp. 259-263). México: McGraw Hill.
- Vian, Á. (2012). Principios de diseño para el grado de agitación. In Á. Vian, *Introducción a la Química Industrial Segunda Edición* (pp. 534-536). Barcelona: Editorial Reverté S.A.
- Lozano, W. (2015). Dimensionamiento para el tanque de almacenamiento. In W. Lozano, *Principios de diseño, control de procesos y laboratorio Primera Edición* (pp. 281-285). Bogotá: Universidad Piloto de Colombia.

- Lozano, W. (2015). Dimensionamiento para el tanque de almacenamiento. In W. Lozano, *Principios de diseño, control de procesos y laboratorio Primera Edición* (pp. 281-287). Bogotá: Universidad Piloto de Colombia.
- Pérez, R. (2020). Diámetro del cilindro. In R. Pérez, *Matemáticas III* (p. 75). México: Klik Soluciones Educativas S.A. .
- Palme, C., & Bibb, S. (2003). Área del cilindro. In C. Palme, & S. Bibb, *Matemáticas prácticas Segunda Edición* (pp. 388-389). Barcelona: Editorial Reverté S.A. .
- Ministerio de Desarrollo Económico. (2000). Parámetros de diseño para trampas de grasa. In M. d. Económico, *Reglamento Técnico del Sector de agua potable y saneamiento básico RAS 2000, Sección II Título E para Tratamiento de aguas residuales* (pp. 28-29). Bogotá: Ministerio de Desarrollo Económico Dirección de Agua Potable y Saneamiento Básico.
- Barraza, A. (2007). Valoración del coeficiente de confiabilidad. In A. Barraza, *Apuntes sobre Metodología de Investigación* (p. 8). Durango: Universidad Pedagógica de Durango.
- Smith, R. (2016). *Chemical Process, Design and Integration*. United Kingdom: John Wiley & Sons. Ltd.
- Gobierno del Ecuator. (2015, enero 14). Retrieved from Ratificada sanción por incumplimiento: <https://www.ambiente.gob.ec/ratificada-sancion-por-incumplimiento/>
- LenTech. (2012, 10 05). Retrieved from Información del producto: <https://www.lentech.com/Data-sheets/Lewatit-A-365-SP-L.pdf>
- Dardel, F. (2021, Enero 20). *Ion exchange site map*. Retrieved from Dardel : <http://dardel.info/IX/index.html>
- Health & Life S.A. (HELISA). (2022). Retrieved from Calidad, Innovación y Desarrollo: www.helisa.ec

APÉNDICE

Apéndice A

Adicionalmente, se elaboró un algoritmo en Python en el que el usuario puede interactuar con el menú digital para obtener el caudal experimental de diseño y el dimensionamiento de los equipos que requiere emplear para el funcionamiento de su sistema de tratamiento de aguas residuales.

```
from tabulate import tabulate
import numpy as np
diccionarioLimitesDescarga={'Aceites y grasas': 70.0, 'Explosivos o inflamables': 0.0,
                             'Alkil mercurio': 0.0,'Aluminio': 5.0,'Arsénico total': 0.1,
                             'Cadmio': 0.02,'Cianuro total': 1.0,'Cinc': 10, 'Cloro activo': 0.5,
                             'Cloroformo': 0.1, 'Cobalto total': 0.5, 'Cobre': 1.0,
                             'Compuestos fenolicos': 0.2, 'Compuestos organoclorados': 0.05,
                             'Cromo Hexavalente': 0.5,'Demanda Bioquímica de Oxígeno (5 días)': 250,
                             'Demanda Química de Oxígeno': 500, 'Dicloroetileno': 1,
                             'Fósforo Total': 15, 'Hidrocarburos Totales de Petróleo': 20,
                             'Hierro total': 25,'Manganeso total': 10, 'Mercurio (total)': 0.01,
                             'Níquel': 2,'Nitrógeno Total Kjedahl': 60,'Organofosforados': 0.1,
                             'Plata': 0.5,'Plomo': 0.5,'Selenio': 0.5,'Sólidos Sedimentables': 20,
                             'Sólidos Suspendidos Totales': 220, 'Sólidos totales': 1600,
                             'Sulfatos': 400,'Sulfuros': 1,'Temperatura': 40,
                             'Tensoactivos': 2, 'Tetracloruro de carbono': 1,'Tricloroetileno': 1}

print("\033[1miBienvenido!\033[0m")
nombre = input(" Ingrese su nombre: ")
print()
print("\033[1miHola!,"nombre)
print("\033[1mSoy su guía para diseñar un sistema de tratamiento de aguas residuales")
print()
print("\033[1mEl primer paso para diseñar una PTAR será conocer su caudal\033[0m")
menu=' '
listaVolumen = []
listaTiempo = []
listaCaudal = []
while menu!='3':
    print("\033[1m
    Programa
    1.- Calcular el caudal experimental
```

Figura A.1. Algoritmo en Python

Como se puede observar en la figura A.2, el programa le ayuda al usuario a determinar el caudal experimental a partir del volumen y tiempo. De la misma manera, el programa calcula el valor promedio, mínimo, máximo y desviación estándar del caudal.

¡Bienvenido!

Ingrese su nombre: Joselyn

¡Hola!, Joselyn

Soy su guía para diseñar un sistema de tratamiento de aguas residuales

El primer paso para diseñar una PTAR será conocer su caudal

Programa

- 1.- Calcular el caudal experimental**
- 2.- Ingresar el caudal de diseño**
- 3.- Salir**

Ingrese opción: 1

Ingrese el número de días en los que realizó la experimentación: 3

Ingrese el volumen [L]: 550

Ingrese el tiempo [min]: 460

Ingrese el volumen [L]: 670

Ingrese el tiempo [min]: 560

Ingrese el volumen [L]: 620

Ingrese el tiempo [min]: 500

Los resultados para el caudal experimental en 3 días son:

[1.1956521739130435, 1.1964285714285714, 1.24] L/min

- El valor promedio para el caudal experimental es: 1.21 L/min
- El valor de la desviación estándar es: 0.02 L/min
- El valor máximo del caudal experimental es: 1.24 L/min
- El valor mínimo del caudal experimental es: 1.20 L/min

Figura A.2. Cálculo del caudal experimental

En la figura A.3, el programa le pide al usuario ingresar los valores obtenidos en su caracterización inicial, los cuales son comparados con la Normativa de Descarga de Efluentes al Alcantarillado Público, indicando si cumple o no con los parámetros establecidos.

El segundo paso será realizar un análisis preliminar de las aguas residuales

Lista de límites de descarga al sistema de alcantarillado público:

- 1 . Aceites y grasas = 70.0 mg/L**
 Ingrese valor de su caracterización: 90
 Parámetro fuera de la Normativa
- 2 . Explosivos o inflamables = 0.0 mg/L**
 Ingrese valor de su caracterización: 0.1
 Parámetro fuera de la Normativa
- 3 . Alkil mercurio = 0.0 mg/L**
 Ingrese valor de su caracterización: 0
 Parámetro cumple con la Normativa
- 4 . Aluminio = 5.0 mg/L**
 Ingrese valor de su caracterización: 2
 Parámetro cumple con la Normativa
- 5 . Arsénico total = 0.1 mg/L**
 Ingrese valor de su caracterización: 1
 Parámetro fuera de la Normativa
- 6 . Cadmio = 0.02 mg/L**
 Ingrese valor de su caracterización: 0
 Parámetro cumple con la Normativa

Figura A.3. Análisis preliminar de las aguas residuales

La figura A.4 presenta una lista de los parámetros críticos del sistema, es decir, aquellos que no cumplen con la Normativa Ambiental.

Lista de los parámetros críticos del sistema		
Parámetro	Límite de la Normativa [mg/L]	Resultado del cliente [mg/L]
Aceites y grasas	70	90
Explosivos o inflamables	0	0.1
Arsénico total	0.1	1

Figura A.4. Lista de los parámetros críticos del sistema

La figura A.5 le da al usuario un poco de información acerca de los tratamientos por lo que tiene que pasar el agua residual antes de ser tratada.

El tercer paso será decidir el tipo de tratamiento que se le dará al agua residual

¿Sabías qué?

El pretratamiento trabaja con los procesos físicos
Su propósito es:

- Detención de sólidos flotantes
- Disminución de sólidos
- Separación de aceites y grasas
- Homogeneización de caudal

Los modelos que utilizan son:

- Detención de sólidos flotantes
- Cribado
- Tamizado
- Desarenado
- Desengrasado
- Homogeneización

El tratamiento primario trabaja con los procesos físicos
Su propósito es:

- Disminución del DBO5 en un 25% y de sólidos suspendidos en un 50-80%

Los modelos que utilizan son:

- Detención de sólidos flotantes
- Floculación
- Sedimentación
- Coagulación

El tratamiento secundario trabaja con los procesos biológicos
Su propósito es:

- Reducción del DBO original en un 75-90% y los Sólidos totales en un 95%

Los modelos que utilizan son:

- Procesos anaeróbicos
- Procesos aeróbicos

Figura A.5. Información técnica sobre los tratamientos

En la figura A.6 se vuelve a presentar el menú digital en el que le pregunta al usuario el tipo de tratamiento desea realizar para obtener el dimensionamiento de los equipos correspondientes.

```

Tipo de Tratamiento
1.- Pretratamiento
2.- Tratamiento Primario
3.- Tratamiento Secundario
4.- Tratamiento Terciario
5.- Desinfección
6.- Salir

Ingrese opción: 1

Ha seleccionado el Pretratamiento

Desea obtener el dimensionamiento de:
1) Criba
2) Tamiz
3) Desarenador
4) Desengrasador
5) Trampa de grasas
6) Tanque de Homogeneización
7) Salir

Ingrese opción: 5

Las dimensiones para su trampa de grasas son:
- Volumen = 0.05 m3
- Área = 0.05 m2
- Altura = 0.90 m
- Ancho = 0.45 m
- Longitud = 0.11 m

```

Figura A.6. Menú digital para selección del tipo de tratamiento

La figura A.7 presenta un ejemplo de la obtención del dimensionamiento del tanque de homogeneización a partir del tiempo de residencia que le solicita al usuario y el caudal experimental que fue hallado al inicio del programa.

```
Desea obtener el dimensionamiento de:
1) Criba
2) Tamiz
3) Desarenador
4) Desengrasador
5) Trampa de grasas
6) Tanque de Homogeneización
7) Salir

Ingrese opción: 6

Ingrese su tiempo de residencia [min]: 60
Las dimensiones para su tanque de homogeneización son:
- Volumen = 0.09 m3
- Área = 1.15 m2
- Altura = 0.39 m
- Diámetro = 0.55 m
- Radio = 0.28 m

Desea obtener el dimensionamiento de:
1) Criba
2) Tamiz
3) Desarenador
4) Desengrasador
5) Trampa de grasas
6) Tanque de Homogeneización
7) Salir

Ingrese opción: 7
```

Figura A.7. Dimensionamiento de los equipos para el tratamiento

Finalmente, en la figura A.8 se puede observar la salida del programa, una vez que el programa halla determinado todas las dimensiones de los equipos necesarios por el cliente.

```
Tipo de Tratamiento
1.- Pretratamiento
2.- Tratamiento Primario
3.- Tratamiento Secundario
4.- Tratamiento Terciario
5.- Desinfección
6.- Salir

Ingrese opción: 6

Programa
1.- Calcular el caudal experimental
2.- Ingresar el caudal de diseño
3.- Salir

Ingrese opción: 3
```

Figura A.8. Salida del programa