

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas**

Rediseño del tratamiento primario de aguas residuales de una industria  
recicladora de plásticos

**PROYECTO INTEGRADOR**

Previo la obtención del Título de:

**Ingeniero Químico**

Presentado por:

Erick Fernando Moscoso Yulán

Manuel Alfredo Usho Ramírez

GUAYAQUIL - ECUADOR

2019

## DEDICATORIA

Dedico este proyecto a mi amada madre, Dolores Marisel, mi pilar fundamental, que me enseñó la perseverancia con su mismo ejemplo, quien vez tras vez me levantó cuando me tropezaba durante mi camino estudiantil y me apoyó en todas las etapas de mi carrera.

A mis hermanos, Pedro y Santiago, quienes siempre estuvieron dispuestos a ayudarme emocional e intelectualmente.

A mis amigos y colegas, que permanecieron junto a mí, aún en los momentos más difíciles, brindándome su cariño y amistad incondicional.

## DEDICATORIA

El presente proyecto lo dedico a mis padres Manuel Aurelio y María Ligia, mis abuelos Manuel Ángel e Inés Floresmila, mis hermanos y a toda mi familia que con sus ánimos y apoyo constante han sido parte de mi vida estudiantil, creyendo en mis capacidades para seguir adelante, y de esa manera poder llegar a ser una persona visionaria, que no se ha rendido a pesar de todas los obstáculos que han estado en mi camino.

A mis amigos que han sido mis compañeros en esta etapa de la vida, y han estado en los momentos que más los he necesitado, apoyando con su optimismo y compañía.


## **AGRADECIMIENTOS**

Nuestro más sincero agradecimiento a todos los profesores que han sido parte de nuestro camino profesional, en especial al Ingeniero Raúl Serrano, la Ingeniera Nadia Flores, y nuestros tutores Ingeniero Juan José Izurieta y la Ingeniera Andrea Barcia, que han sido los promotores de este proyecto y gracias a ellos hemos podido culminarlo con éxito.

También al Ingeniero Francisco Torres, y la Ingeniera Andrea Rosado, por su ayuda constante en los laboratorios que hemos necesitado.

## DECLARACIÓN EXPRESA

"Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; Erick Fernando Moscoso Yulán y Manuel Alfredo Usho Ramírez, 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"



Erick Fernando  
Moscoso Yulán



Manuel Alfredo Usho  
Ramírez

## EVALUADORES

  
-----  
**Ing. Nadia Flores**

PROFESOR DE LA MATERIA

  
-----  
**Ing. Juan José Izurieta**

PROFESOR TUTOR

  
-----  
**Ing. Andrea Barcia**

PROFESOR CO – TUTOR

## RESUMEN

La industria de reciclaje de plásticos realiza los procesos operativos de selección, lavado, centrifugado, elaboración y comercialización de pellet. La planta de tratamiento de aguas residuales cuenta con un sistema de remoción de sólidos disueltos y en suspensión, con el propósito de generar una corriente de salida limpia, óptima para ser recirculada y utilizada como agua de lavado. Se conoce que la corriente de salida de la planta de tratamiento de aguas tiene los valores de sus parámetros de calidad fuera del rango estipulado por la ley ambiental, además de presentar turbidez y partículas en suspensión.

El estudio se encuentra centrado en los procesos de floculación, coagulación y sedimentación, que son los fundamentales en el tratamiento primario. En una planta de tratamiento de aguas residuales es fundamental que cada unidad de tratamiento opere de forma óptima. En caso que cualquier unidad de tratamiento esté operando con fallas el daño es consecutivo aguas abajo. La empresa recicladora de plásticos tiene como finalidad solucionar sus problemas en la unidad depuradora para evitar gastos por mantenimiento o deterioro de los equipos de la planta de tratamiento. Adicionalmente busca determinar el modelo más conveniente de rediseño que le proporcione beneficios a nivel económico, es decir busca la mejor alternativa al menor precio posible.

El proyecto identificó las unidades de la PTAR que no se encuentran trabajando de forma óptima para ser rediseñadas, teniendo como resultado el rediseño completo del tratamiento preliminar y primario de la PTAR, con un nuevo equipo de retención de sólidos, también la correcta dosificación en los procesos de floculación y coagulación, concluyendo con un considerable aumento de la eficiencia del proceso de depuración de aguas residuales.

**Palabras Clave:** Unidad depuradora, Floculación, Coagulación, Rediseño, Hidrocilón.

## **ABSTRACT**

*The plastics recycling industry carries out the operative processes of selection, washing, spinning, pellet processing and commercialization. The water treatment plant in the plastics recycling industry to be studied has a system of removal of dissolved and suspended solids, with the purpose of generating a clean, optimal outlet current to be recirculated and used as washing water. It is known that the output current of the water treatment plant has the values of its quality parameters outside the range stipulated by the environmental law, in addition to presenting turbidity and suspended particles.*

*The study is focused on the processes of flocculation, coagulation and sedimentation, which are the fundamentals in primary treatment. In a wastewater treatment plant it is essential that each treatment unit operates optimally. In case any treatment unit is operating with failures the damage is consecutive. The plastics recycling company aims to solve its problems in the treatment unit to avoid expenses for maintenance or deterioration of the equipment of the treatment plant. It also seeks to determine the most convenient redesign model that provides benefits at the economic level, that is, it seeks the best alternative at the lowest possible price.*

*The project, according to the determination of the operating parameters, identified the operating processes to be redesigned, resulting in the complete redesign of the primary treatment of the PTAR, with a new solids retention equipment and a hydrocyclone, also the correct dosage in the flocculation and coagulation processes, concluding with a considerable increase in the efficiency of the wastewater treatment process.*

**Keywords:** *Treatment unit, Flocculation, Coagulation, Redesign, Hydrocyclone.*



## ÍNDICE GENERAL

EVALUADORES .....	¡Error! Marcador no definido.
RESUMEN .....	I
ABSTRACT.....	II
ÍNDICE GENERAL.....	III
ABREVIATURAS .....	VI
SIMBOLOGÍA .....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VIII
ÍNDICE DE TABLAS .....	IX
CAPÍTULO 1 .....	11
1. Introducción .....	11
1.1 Descripción del problema .....	11
1.2 Justificación del problema.....	12
1.3 Objetivos.....	13
1.3.1 Objetivo General .....	13
1.3.2 Objetivos Específicos .....	13
1.4 Marco teórico.....	14
1.4.1 Parámetros de interés.....	15
1.4.2 Tratamientos de Aguas Residuales.....	16
CAPÍTULO 2.....	21
2. Metodología .....	21
2.1 Evaluación del estado de la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) de la industria recicladora de plásticos .....	21
2.1.1 Criba.....	21
2.1.2 Tanque homogeneizador .....	22
2.1.3 Reactor de floculación y coagulación.....	22

2.1.4	Reactor de coagulación.....	22
2.1.5	Unidad de flotación por inyección de Aire (DAF).....	22
2.1.6	Filtro de arena fina, grava y carbón activado .....	23
2.1.7	Disposición final de los lodos .....	23
2.2	Diagnóstico del efluente de la PTAR .....	24
2.2.1	Muestreo .....	24
2.2.2	Análisis de sólidos presentes .....	25
2.2.3	Medición de pH, Oxígeno disuelto (OD) y Turbidez .....	27
2.2.4	Medición de DBO y DQO .....	28
2.2.5	Ensayo de Granulometría .....	28
2.3	Diseño de unidades propuestas para el pretratamiento para la PTAR .....	30
2.3.1	Diseño de la Criba.....	30
2.3.2	Diseño del hidrociclón .....	33
2.4	Análisis post – tratamiento primario.....	36
2.4.1	Ensayo de % de remoción “Test de Jarras” .....	36
2.5	Validación de la propuesta.....	38
2.5.2	Flujo de caja.....	41
CAPÍTULO 3 .....		43
3.	RESULTADOS Y ANÁLISIS .....	43
3.1	Evaluación previa de la PTAR .....	43
3.2	Criba .....	43
3.2.1	Ensayo de Granulometría .....	43
3.2.2	Dimensionamiento de la criba .....	44
3.2.3	Configuración de la instalación .....	45
3.2.4	Evaluación del resultado de la criba.....	45
3.3	Hidrociclón.....	46

3.3.1	Dimensionamiento del hidrociclón.....	46
3.4	Floculación y coagulación.....	49
3.4.1	Ensayo de “Test de Jarras” .....	49
3.5	Análisis financiero.....	51
3.5.1	Costos e Ingresos .....	51
3.5.2	Tasas fijas, valor de salvamento y depreciación. ....	52
3.5.3	Resultados del flujo de caja .....	52
3.6	Evaluación final de la PTAR .....	53
CAPÍTULO 4	.....	55
4.	Conclusiones y recomendaciones.....	55
4.1	Conclusiones .....	55
4.2	Recomendaciones .....	57
BIBLIOGRAFÍA	.....	60
APÉNDICE	.....	63
APÉNDICE A - CÁLCULOS	.....	64
APÉNDICE B - Ensayos de Granulometría .....	74	
APÉNDICE C - Tablas y gráficos para obtención de datos .....	79	
APÉNDICE D – Registro de fotos .....	86	

## **ABREVIATURAS**

PTAR	Planta de Tratamiento de Aguas Residuales
ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
DAF	Flotación de Aire Disuelto
TULSMA	Texto Unificado de Legislación Secundaria del Medio Ambiente
DBO	Demanda Bioquímica de Oxígeno
DQO	Demanda Química de Oxígeno
SS	Sólidos Suspendidos
OD	Oxígeno Disuelto
SST	Sólidos Suspendidos Totales
NTU	Unidades Nefelométricas de Turbidez
USGMP	Galón Americano Por Minuto
ASTM	American Society for Testing and Materials
TMAR	Tasa mínima aceptable de rendimiento
TIR	Tasa interna de Retorno
VAN	Valor Actual Neto
FNE	Flujo Neto Efectivo
DL	Depreciación Lineal

## SIMBOLOGÍA

m	Métro
cm	Centímetro
mm	Milímetro
$\mu\text{m}$	Micrómetro
TM	Tonelada métrica
Kg	Kilogramo
g	Gramo
mg	Miligramo
L	Litro
mL	Mililitro
Usgpm	Galón por minuto americano
ppm	Partes por millón
pH	Potencial de Hidrógeno
kPa	Kilo Pascal
kW	Kilovatio
h	Hora
°C	Grado Celcius
s	Segundo
mV	Milivoltio
in	Pulgada ( <i>Inch</i> )
mN	Mega Newton
cP	Centipoise
rpm	Revoluciones por minuto
Psi	Libras por pulgada cuadrada

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Dimensiones de un hidrociclón (APC, 1998) .....	35
Figura 2.2 Diagrama de validación – Elaborado en LUCIDCHART .....	39
Figura 3.1 Curva Granulométrica.....	44
Figura 3.2 Porcentaje de remoción .....	50
Figura 3.3 Variacion de SST de acuerdo a la dosis .....	51

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Objetivos de procesos de tratamientos preliminares (Rodas, 2002).....	17
Tabla 2.1 Características del filtro prensa de la PTAR (Kwell, 2018).....	23
Tabla 2.2 Distribución de las muestras de agua .....	24
Tabla 2.3 Materiales y equipos necesarios para el ensayo TSS .....	25
Tabla 2.4 Materiales y equipos requeridos para el ensayo SS .....	26
Tabla 2.5 Rango y precisión de lectura del multiparámetro HACH HQ40D (HACH, Latam HACH, 2019).....	27
Tabla 2.6 Rango y precisión de lectura del turbidímetro HACH portátil 2100Q (HACH, Es HACH, 2019) .....	27
Tabla 2.7 Precisión de la lectura para DBO y DQO proporcionada por el laboratorio	28
Tabla 2.8 Registro de distribución de partícula .....	29
Tabla 2.9 Cálculos requeridos para determinar la retención de partícula por tamaño de tamiz .....	30
Tabla 2.10 Parámetros de diseño para una criba - Tamiz .....	32
Tabla 2.11 Proporciones del hidrociclón en función del diámetro de la cámara de alimentación (APC, 1998) .....	36
Tabla 2.12 Materiales, equipos y reactivos necesarios para elaborar un “Test de Jarras” .....	36
Tabla 2.13 Propiedades físico – químicas del Floculante .....	37
Tabla 2.14 Propiedades físico – químicas del coagulante .....	37
Tabla 2.15 Ecuaciones de costos .....	40
Tabla 3.1 Análisis previo al rediseño de la PTAR .....	43
Tabla 3.2 Resultados de ensayo de granulometría.....	43
Tabla 3.3 Factores de Importancia de la Criba .....	44
Tabla 3.4 Resultados del análisis a la salida de la criba.....	45
Tabla 3.5 Requerimientos del modelo del hidrociclón.....	46
Tabla 3.6 Balance de materia para el hidrociclón .....	47
Tabla 3.7 Factores de corrección.....	47
Tabla 3.8 Dimensiones finales del hidrociclón .....	47
Tabla 3.9 Resultados del dimensionamiento .....	48

Tabla 3.10 Índice de Floculación de Willcomb (Alboleda Valencia, 2008) .....	49
Tabla 3.11 Resultados de Prueba de Test de Jarras.....	49
Tabla 3.12 Parámetros de comprobación .....	50
Tabla 3.13 Estimación de costos e ingresos.....	51
Tabla 3.14 Valores de interés para establecer un flujo de caja .....	52
Tabla 3.15 Valor actual neto y Tasa interna de retorno .....	52
Tabla 3.16 Resultados de ensayos finales .....	53



# CAPÍTULO 1

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 Descripción del problema

En la actualidad, la unidad depuradora de agua se encuentra en constante uso, debido a que se utiliza agua de lavado todos los días laborables. Sin embargo, esta unidad sólo desempeña el proceso de filtración, es decir el efluente tiene sus características físico-químicas fuera de los parámetros permisibles para ser recirculado, esto implica acumulación de sólidos sedimentables y material particulado. Este efluente al contener material orgánico residual como sólidos disueltos, produce acumulación de sólidos sedimentables, saturando por completo el sistema de remoción de sólidos.

La acumulación de sólidos disueltos y suspendidos representa un problema porque producen daños en cadena a cada unidad de la planta de tratamiento de aguas. Como por ejemplo en los reactores de floculación y coagulación. Debido a que hay presencia de sólidos no disueltos, se presenta una saturación en el agua e impide que la reacción se desempeñe correctamente. Este efecto ocasiona otro problema a la unidad de sedimentación (DAF) el cual se encarga de empujar los sólidos convertidos en lodos y posteriormente removerlos. El sistema de flotación cuenta con inyección de aire por parte de una bomba, si el agua se encuentra cargada de partículas pesadas la presión manométrica del fluido es mayor y la bomba de inyección se ve forzada a trabajar a una presión por encima de su diseño, causando mantenimientos forzados y reduciendo la vida útil. Por otro lado, en la red de tuberías se producen obstrucciones por incrustaciones de sólidos y la unidad de filtración se satura constantemente, al saturarse los filtros conformados por arena y carbón, su capacidad de retención por absorción y adsorción disminuye. Debido a todos los inconvenientes se paraliza la planta de tratamiento de aguas residuales cada dos días para realizar limpieza manual.

## 1.2 Justificación del problema

El presente trabajo es un proyecto de rectificación a un sistema instalado de tratamiento de aguas residuales, que hasta el momento no está funcionando correctamente. Motivo por la cual la empresa requiere dar solución a su problema de tratamiento de las aguas residuales. El trabajo del tratamiento de estas aguas es muy importante, ya que el recurso agua es el más indispensable para la humanidad, y debe ser utilizada de manera sustentable (Unesco, 2003).

El agua residual tratada de esta planta de reciclaje, es un recurso que favorece a la empresa, ya que es reutilizada para lavado, de esta manera se evita el uso de más agua que puede ser destinada para otras áreas. Disminuyendo así la sostenibilidad, mediante la huella hídrica generada por la planta, y los costos de operación. Al hablar de huella hídrica nos referimos a un indicador de sostenibilidad que se mide con respecto al volumen de agua dulce que la empresa utiliza, en este caso el agua consumida, evaporada y contaminada, por unidad de tiempo o unidad de masa (Codorchem Envitech, 2013).

La reutilización del agua que procede de los diferentes procesos industriales, es una necesidad, ya que responde al hecho de que, a nivel mundial, solamente el 12% del agua industrial es reciclada, con respecto a esto se puede llegar hasta un 90% de ahorro en energía y un 70% de ahorro en agua, si se invierte los diferentes procesos de recuperación y reutilización (Acciona - Business as unusual, 2018).

Por otro lado, la normativa ambiental del Ecuador es más rigurosa y controlada en la actualidad. Para que una empresa o industria pueda operar de forma legal debe estar bajo revisión y aprobación de los organismos competentes que designa el Ministerio del Ambiente. En el sexto libro del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Medio Ambiente, en el anexo 1 se fijan los parámetros de descarga de efluentes para industria. La ley declara que el tratamiento de aguas es fundamental para preservar el ambiente y la recuperación de espacios naturales (TULSMA, 2018).

### **1.3 Objetivos**

#### **1.3.1 Objetivo General**

Rediseñar el tratamiento primario de la planta depuradora de aguas residuales de la industria recicladora de plásticos mediante la aplicación de procesos físicos y químicos para la obtención de un tratamiento óptimo.

#### **1.3.2 Objetivos Específicos**

1. Identificar unidades de mejora de la planta de tratamiento de aguas residuales de industria de plástico, mediante la ejecución de inspecciones técnicas para determinación de los equipos que trabajan ineficientemente
2. Analizar los principales parámetros del agua residual (DBO, DQO, pH, turbidez, sólidos suspendidos) de la industria de plástico, para la caracterización de su nivel de contaminación.
3. Diseñar una unidad de remoción de sólidos pesados que cumpla con un presupuesto accesible y sea viable para instalación, en el tratamiento primario de aguas residuales.
4. Validar el proceso de rediseño mediante ensayos de laboratorio, determinando la eficiencia por comparación de los parámetros de las muestras antes y después de la optimización.
5. Formular recomendaciones que incrementen la productividad y la eficiencia en cada operación unitaria para futuras mejoras en la optimización.

#### 1.4 Marco teórico

El ser humano con el avance a grandes pasos del sector industrial, día a día aumenta la cantidad de generación de aguas residuales, siendo este un subproducto inevitable. Para el correcto manejo de estas aguas, se requiere de un conocimiento profundo sobre el tema, ya que implica a la parte biológica, química, física y los posibles efectos que puede ocasionar en su posterior lugar de recepción.

Al hablar de aguas residuales, se refiere a todos los efluentes que provienen de residuos domésticos, también de diferentes procesos industriales, los cuales antes de llegar a su desecho final, tienen que pasar por algún tipo de tratamiento, para que cumpla con los diferentes parámetros que requiere la ley orgánica de recursos hídricos (Marsilli, 2005).

Es muy importante la exactitud y precisión, al momento de la caracterización del agua residual, el día de hoy se tiene un gran número de métodos de muestreo y caracterización, y cada uno depende del propósito de estudio, todo esto para asegurar una conformidad con las normas estándar, tomando en cuenta el tipo de muestra, la cantidad de estas y los parámetros que se quieren analizar (Rodas, 2002).

En el tratamiento de aguas residuales, se realizan varios procesos físicos, químicos y biológicos, cada uno de ellos con el fin de erradicar los contaminantes de cada clase respectivamente, que encontramos presente en el agua a tratar. Como meta del tratamiento se tiene la de producir un agua que sea amigable con el medio ambiente y un residuo sólido también conocido como fango o bio – sólido, que cuenten con los más mínimos niveles de contaminación, algo que sea sostenible (Sette Ramalho, 1990).

Retomando la parte de las características físicas, químicas y biológicas que el agua debe tener para retornar al ambiente y que no sea nocivo para la vida, se detalla algunas para entender la importancia que es el tratamiento de las aguas residuales.

**Características Físicas**, conductividad, olor, temperatura, color y turbiedad.

**Características Químicas**, fosfatos, sulfatos, acidez, alcalinidad, dureza, materia orgánica, agentes espumeantes, pH, grasas, metales pesados, asbesto, fenoles, fluoruros, hidrocarburos, entre otros que dependen del origen del agua residual (Agua Latinoamérica, 2018).

**Característica Biológicas**, aquí tenemos algas, bacterias, rotíferos, copépodos, helmintos, insectos, entre otros (Agua Latinoamérica, 2018).

Entre todos los parámetros de la calidad del agua, se detalla a continuación los de más importancia para la elaboración de este proyecto.

#### 1.4.1 Parámetros de interés.

El diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales, necesita algunos parámetros de estudio, entre los cuales los de más interés son detallados a continuación:

**OD (oxígeno disuelto)**, se lo conoce como aquel indicador de la concentración del oxígeno que esta disuelto en el agua, por lo general se mide en mg/L. Este gas es poco soluble en el agua, entonces dicha solubilidad depende la presión, la temperatura y las sales disueltas. (Fibras y Normas de Colombia S.A.S., 2018)

**DBO (Demanda Bioquímica de Oxígeno)**, indirectamente este es un indicador que ayuda a determinar la concentración de la materia química biodegradable, por medio de la demanda de oxígeno que microorganismos necesitan para la respiración. Se puede considerar que un efluente es biodegradable cuando se tiene una relación DQO/DBO menor a 5 (Mejias Barrios, 2010).

**DQO (Demanda Química de Oxígeno)**, este es un indicador para la materia orgánica, que se basa en la concentración que se necesita de oxígeno para la oxidación de la materia orgánica, tanto biodegradable como no biodegradable. (Serra Valente, Magalhães Padilha, & Marques Silva, 1997)

**pH**, el parámetro más conocido y utilizado en la materia, el cual indica si la acidez o la basicidad de una muestra, mide el logaritmo de la actividad del hidrógeno. (Harris, 2007).

**Turbidez**, trata sobre la medida de la pérdida de la transparencia de la muestra de agua, que generalmente suele ser ocasionado por la presencia de material particulado o en suspensión, en nuestro caso este material sería partículas de propileno de alta y baja densidad, entre otros. La turbidez se relaciona con el tamaño de este material particulado, ya que mientras el agua tenga un menor tamaño de partícula, la turbidez aumentará. (Delgadillo, Camacho, Pérez, & Andrade, 2010)

**Sólidos en Suspensión**, o también llamados sólidos no sedimentables, que son aquellos que se encuentran en suspensión constante, y su remoción solo puede ser realizada por un dispositivo físico, como una criba.

**Sólidos Disueltos**, otro nombre que se les da es la salinidad total, quiere decir que es la materia tanto de origen orgánico como inorgánico que está disuelta en el agua, que se puede medir por evaporación, es muy importante conocer este parámetro, ya que, en el sector industrial, la excesiva cantidad de estos, podrían causar interferencias en los procesos de la empresa. La suma de estos con los sólidos en suspensión nos da la cantidad de sólidos totales (Rigola Lapeña, 1990).

#### 1.4.2 Tratamientos de Aguas Residuales

La correcta elección del método a utilizarse para el tratamiento de aguas residuales, tiene que ver con el origen del agua a ser tratada, el respectivo uso que se le dará al efluente de la planta de tratamiento, la disponibilidad de medios que se tenga para la evacuación de contaminantes finales, que los diferentes procesos y operaciones sean compatibles y la disponibilidad económica que la empresa tenga para la inversión en la planta de tratamiento (Rodas, 2002).

Para los sistemas de remoción de sólidos disueltos, existe precipitación, destilación, intercambio iónico, electrodiálisis y ósmosis inversa, mientras que para los de remoción de sólidos en suspensión, pueden ser separados por filtración y decantación (Rigola Lapeña, 1990).

Etapas del Tratamiento de Aguas Residuales.

**Comentado [AFBQ1]:** Este párrafo está muy confuso al ser leído. Coloquen más oraciones en un párrafo

**Comentado [M2R1]:** Corregido

Para el mejor estudio y por la costumbre existente en Latinoamérica, una planta de tratamiento de aguas residuales, se divide en 4 etapas que son (Rodas, 2002):

- Tratamiento preliminar o pre tratamiento.
- Tratamiento primario.
- Tratamiento secundario.
- Tratamiento terciario o avanzado.

Comentado [AFBQ3]: Justificar, en donde obtuvieron que para esto es el mejor estudio

Comentado [M4R3]: Citado

Comentado [M5R3]:

#### 1.4.2.1 Tratamiento Preliminar

Esta etapa se encarga del acondicionamiento o preparación del agua cruda, como la regulación del caudal con la que ingresa, también la extracción de los sólidos flotantes de gran tamaño, arena, grasas, que por lo general se realizan con un procedimiento de filtración, este es necesario para el correcto desarrollo de las siguientes fases, ya que tiene el objetivo de evitar la erosión a las instalaciones, taponamientos y saturación de equipos. En algunos casos se realiza una pre-aireación, para eliminar compuestos volátiles que normalmente son los que ocasionan el mal olor. (Fibras y Normas de Colombia S.A.S., 2018).

Tabla 1.1 Objetivos de procesos de tratamientos preliminares (Rodas, 2002)

PROCESO	OBJETIVO
Cribado	Eliminación de sólidos gruesos
Trituradores	Desmenuzamiento de sólidos
Desarenadores	Eliminación de arenas y gravilla
Desengrasadores	Eliminación de aceites y grasas
Pre – aireación	Control de olor y mejoramiento del comportamiento hidráulico.

#### **1.4.2.1.1 Cribado**

Conocido también por desbrozo, es una operación empleada para disminuir los sólidos de diferente tamaño que se encuentran en suspensión. Su medida entre rejillas dependerá de un ensayo previo de granulometría, para saber el tamaño de los sólidos que se quiere retener. El material sólido que se recoge, por lo general es desechado para su respectiva digestión, en el caso de plantas recicladoras de plástico, este material es reciclado nuevamente (Ramalho, s.f.).

#### **1.4.2.1.2 Trituradores**

Los trituradores son los encargados, de triturar los materiales orgánicos para que se mas fácil su respectivo procesamiento y eliminación en las siguientes etapas (Baca U, y otros, 2014).

#### **1.4.2.1.3 Desarenadores**

Su función es la remoción de arena, grava, o algún tipo de partícula que tenga un peso específico que sea considerablemente mayor que el de los sólidos orgánicos degradables, de esta manera protege los equipos de desbastes, y evita el aglutinamiento de depósitos pesados en los conductos. Son fáciles de limpiar y hay de dos tipos aireado y de flujo horizontal (Rodas Hernández, 2017)

#### **1.4.2.1.4 Desengrasadores**

Se encargan de la eliminación de aceites, grasas y otros materiales que son más ligeros que el agua, para evitar obstrucciones en los demás procesos (Mejias Barrios, 2010).

#### **1.4.2.2 Tratamiento Primario**

La finalidad del tratamiento primario es la de remover por medios físico y mecánicos de una considerable parte del sólido sedimentable o flotante. Se puede recalcar que este tratamiento a parte de retirar la materia incomoda, también lo hace con una parte considerable del material orgánico, que representaría del 25% al 40% del DBO y entre 50% y 65% de los sólidos en suspensión (Rodas, 2002). Se lo conoce también por los procesos de clarificación, decantación o sedimentación que aquí se realizan, ya que en esta etapa se encuentra la piscina de decantación en donde por lo general se debe dejar reposar por aproximadamente 2 horas, con el objetivo



de tener un efluente clarificado y un fango primario que será recolectado para su respectivo procesamiento (Mejias Barrios, 2010).

Entre los tratamientos primarios que existen se destacan los siguientes:

- Sedimentación.
- Flotación.
- Precipitación química.
- Filtros gruesos.
- Oxidación química.
- Coagulación y floculación.
- Filtración.

#### **1.4.2.2.1 La Sedimentación**

Es el método más usado en el tratamiento de aguas residuales, ya que se ve en cada una de las etapas de este, consiste en la separación de sólidos y líquido, debido a la diferencia de pesos específicos entre estas fases. Hay casos en el cual la sedimentación es el único proceso que se utiliza para el tratamiento de agua residual. De acuerdo a la naturaleza de los sólidos en suspensión se considera tres tipos de sedimentación: discreta, por zonas, y con floculación (Ramalho, s.f.).

#### **1.4.2.2.2 Flotación**

La flotación es un proceso que se usa para la separación de partículas sólidas y líquidas presente en aguas residuales, el principio de esta es que los líquidos y sólidos con menor densidad que la del agua flotarán, facilitando su recolección de la superficie. Para separar los sólidos se introducen burbujas de aire al agua, para que estas se adhieran a la partícula en suspensión, generando el ascenso de las mismas, de esta forma se eliminan partículas de mayor densidad a la del agua. También se ve favorecida la flotación de líquidos de menor densidad que el agua. Hay partículas que por ser muy pequeñas tardarían mucho en ser eliminadas por sedimentación, pero por el proceso de flotación son más fáciles de eliminar. Existen tres métodos de flotación que son los más conocidos: Flotación por aire disuelto, aireación a presión atmosférica y flotación por vacío (Sans Fonfría & Ribas, s.f.)

#### **1.4.2.2.1 Unidad DAF (Flotación con Aire Disuelto)**

varios estudios aseguran que este es uno de los procesos con más altos porcentajes aproximadamente el 75% de remoción de sólidos en suspensión, grasas y aceites, su funcionamiento se basa prácticamente en la flotación, quiere la separación de partículas que tengan una densidad menor al líquido en que se encuentra, mediante la inyección de una corriente de aire que sale desde la parte inferior de este, arrastrando todas estas partículas a la superficie, para su respectiva digestión (De Turrís, y otros, 2011).

#### **1.4.2.2.3 Coagulación y floculación**

Coagulación, proceso en el cual componente en suspensión o en disolución estable se desestabilizan por la superación de fuerza que mantienen su estabilidad, se añade un coagulante determinado dependiendo del tipo de agua residual (Aguilar, Sáez, Lloréns, Soler, & Ortuño, 2002). Floculación, proceso por el cual para partículas que se han desestabilizado por la coagulación, se aglutinan por acción de un floculante, previamente preparado, para que se formen partículas estables de gran tamaño, para luego ser decantadas (Aguilar, Sáez, Lloréns, Soler, & Ortuño, 2002).

# CAPÍTULO 2

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1 Evaluación del estado de la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) de la industria recicladora de plásticos

La PTAR se encuentra distribuida de la siguiente forma:

- Sección de tratamiento preliminar
  - Criba
  - Tanque de homogeneización
- Sección de tratamiento primario
  - Reactor de floculación
  - Reactor de coagulación
  - Sistema de flotación por aire disuelto (DAF)
- Sección de filtración y clarificación
  - Filtro de arena fina y grava
  - Filtro de carbón activado
- Zona de disposición final
  - Unidad filtro prensa
  - Zona de almacenaje de lodos

El objetivo del estudio se encuentra en la zona del tratamiento preliminar y primario, es por ello que se detallan a continuación.

#### 2.1.1 Criba

La rejilla utilizada como criba consta de una dimensión de 1m de largo y 0.6m de ancho. Esta misma cuenta con dos ranuras en sus extremos para su colocación y extracción (para la limpieza de la misma). La salida de la planta recicladora de plásticos se encuentra conformado por un conjunto de tuberías que pasan por debajo del suelo, entran a la sección de cribado donde se retienen los sólidos de gran tamaño e ingresan al tanque homogeneizador. (Kwell, 2018)

### **2.1.2 Tanque homogeneizador**

El tanque homogeneizador es el receptor del agua residual, decir el efluente de la planta recicladora de plásticos, y esta cuenta con las siguientes dimensiones: 4m de largo, 1.5m de ancho y 2m de profundidad. Además se encuentra conformado por una sección de entrada al tanque y una bomba con conexión hacia los reactores de floculación y coagulación. (Kwell, 2018)

### **2.1.3 Reactor de floculación y coagulación**

Reactor con agitación constante.

Tanque con las siguientes dimensiones: 2m de altura, 1.5m de ancho, 1.m de largo. En la parte superior se encuentra instalado el motor de agitación que se encuentra unido al agitador (de aspas). En su pared posterior se encuentran las conexiones hacia el tanque de dosificación de floculante. Ambos filtros son de forma cilíndrica, con cabezales, con las siguientes dimensiones: 2.8m de altura y 0.8m de diámetro. (Kwell, 2018)

### **2.1.4 Reactor de coagulación**

Reactor con agitación constante.

Tanque con las siguientes dimensiones: 2m de altura, con un desnivel de 50cm de diferencia de la pared próxima al reactor de floculación, 1.5m de ancho, 1m de largo. En la parte superior se encuentra instalado el motor de agitación unido al agitador (de aspas). En su pared posterior se encuentran las conexiones hacia el tanque de dosificación de coagulante. En su cara lateral que mira hacia la unidad de flotación se encuentra la conexión de tuberías junto con su válvula de compuerta que da paso a la corriente de salida hacia el DAF. (Kwell, 2018)

### **2.1.5 Unidad de flotación por inyección de Aire (DAF)**

La unidad de flotación se compone por un tanque de dimensiones: 4.5m de altura, 2.4m de ancho y 1.7m de largo. Este se encuentra próximo a los reactores. En su parte superior consta de un sistema de remoción de lodos que opera de forma

mecánica. El sistema de remoción es un conjunto de rastrillos metálicos unidos a un conjunto de cadenas que actúan como poleas, dando movimiento constante, favoreciendo la remoción. En la parte inferior del DAF se encuentra la conexión con la bomba de aire disuelto, el cual se encarga de suministrar el mismo, por medio de inyección. El suministro de aire representa dos ventajas, la primera es favorecer la flotación en el sistema y el segundo es mejorar el contacto entre coagulante y materia orgánica, debido que la corriente de salida del reactor tiene reactivo residual producto de la eficiencia del reactor. (Kwell, 2018)

#### 2.1.6 Filtro de arena fina, grava y carbón activado

El sistema de filtración consta de dos filtros en serie, el primero el cual contiene en su interior capas de arena fina y grava. El segundo filtro tiene en su interior capas de arena fina y carbón activado. Estos filtros además de retener el material particulado de menor tamaño cumplen como clarificador e inhibidor de olores por el carbón activado el cual es un agente de adsorción. (Kwell, 2018)

#### 2.1.7 Disposición final de los lodos

##### 2.1.7.1 Unidad filtro prensa

La unidad filtro prensa se encuentra encargada de la separación de los lodos y el líquido residual. El equipo consta de las siguientes especificaciones:

**Tabla 2.1 Características del filtro prensa de la PTAR (Kwell, 2018)**

<b>Tipo de prensado</b>	Hidráulico
<b>Área de filtrado</b>	25 m <sup>2</sup>
<b>Tamaño de placa del filtro</b>	630*630 mm
<b>Número de placa del filtro</b>	36
<b>Filtro de espesor de lodos</b>	30mm
<b>Máxima presión de ingreso</b>	0.6 Mpa
<b>Poder del motor</b>	15KW

### 2.1.7.2 Zona de almacenaje

En la actualidad, la PTAR consta con una zona de almacenaje cerca del filtro prensa. No tiene dimensiones definidas, debido que es una zona “improvisada”, es decir, extraen los lodos residuales y estos los encierran en sacos donde se los deja próximo al filtro donde quedan almacenados para una futura disposición por medio de un gestor ambiental.

## 2.2 Diagnóstico del efluente de la PTAR

Visualmente se pudo concluir que la planta de tratamiento de aguas residuales no está trabajando de su forma más óptima, sin embargo un análisis cualitativo del efluente no es suficiente para validar la premisa. Es por ello que se realizaron ensayos de laboratorio los cuales determinaron las propiedades físico-químicas del agua.

### 2.2.1 Muestreo

El tiempo de vida útil de las muestras de agua es de 24 horas (Rodier, 1981), es por ello que la planificación del muestreo se hizo en base al tiempo de recolección y análisis. El mismo día que se recogía la muestra se realizaban los ensayos de laboratorio, estos se distribuyeron de la siguiente forma:

**Tabla 2.2 Distribución de las muestras de agua**

No de muestras	Capacidad	Ensayo
2	1000mL	Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)
2	200mL	Demanda Química de Oxígeno (DQO)
5	1000mL	Sólidos Suspendidos
5	100mL	Sólidos suspendidos Totales
4	150 mL	Determinación de pH
5	5000g	Granulometría
5	200mL	Turbidez

## 2.2.2 Análisis de sólidos presentes

### 2.2.2.1 Ensayo de sólidos suspendidos totales (TSS)

Para el ensayo TSS se requirieron los siguientes materiales y equipos:

**Tabla 2.3 Materiales y equipos necesarios para el ensayo TSS**

Materiales	Equipos
Matraz Erlenmeyer 250mL	Estufa
Embudo de vidrio	
Vidrio reloj	Balanza analítica
Desecador con silica gel	

Los ensayos se realizaron en el laboratorio de hidrocarburos de la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL), debido que cuentan con los equipos necesarios. Siguiendo el procedimiento a continuación:

- I. Se prepara el sistema de filtración, conformado por el matraz Erlenmeyer junto con el embudo en su parte superior. Dentro del embudo el papel filtro doblado correctamente.
- II. Se pasan 100ml de la muestra sobre el sistema de filtración. Agregando poco a poco para evitar el rebose.
- III. Se coloca el papel filtro junto con el material retenido en el recipiente de aluminio en la estufa a 104°C por una hora y media.
- IV. Se extrae la muestra de la estufa y se coloca en el desecador. Una vez se haya enfriado sacarlo y pesar en la balanza analítica.
- V. Se debe realizar el procedimiento para todas las muestras, sacar el peso promedio
- VI. Como último paso, se calcula TSS, mediante la siguiente ecuación:

$$TSS \left[ \frac{mg}{L} \right] = \frac{PProm_f - PProm_o [mg]}{Volumen \text{ de muestra individual } [L]} \quad (2.1)$$

Procedimiento tomado de (WEF, 2017)

Donde:

- $PProm_f$  es la nomenclatura utilizada para referirse al peso promedio del papel filtro después del proceso de filtrado de la muestra
- $PProm_o$  representa el peso del filtro promedio, después de ser lavado y secado.

### 2.2.2.2 Ensayo de sólidos suspendidos

Para el ensayo se requirieron los siguientes materiales y equipos:

**Tabla 2.4 Materiales y equipos requeridos para el ensayo SS**

Materiales	Equipos
Cono Lmhoff 1L	Estufa
Crisol de porcelana	Balanza analítica
Vidrio reloj	Bomba de vacío
Desecador con silica gel	
Matraz Kitasato 250 mL	
Embudo de Büchner	
Pizeta con agua destilada	

Una vez armado el sistema de filtración (papel filtro fijo al embudo de Büchner, y la bomba al vacío conectada por medio de una manguera a la salida del matraz kitazato) se realiza el siguiente procedimiento:

- I. Se coloca 1L de la muestra dentro del cono lmhoff, donde luego se lo deja reposar por 1 hora.
- II. Una vez transcurrido el tiempo se realiza la lectura de los sólidos presentes.  
La lectura en el cono es  $\frac{mL \text{ de sólidos}}{mL \text{ de agua de muestra}}$
- III. Se mide el pH, conductividad y temperatura al agua. Se anotan los parámetros.
- IV. Se toman 50mL de muestra con un vaso de precipitación y se lo pasa por el sistema de filtración al vacío.
- V. Se recoge el papel filtro y se lo lleva a un crisol de porcelana.
- VI. Se introduce la muestra a la estufa a 105°C durante 1 hora.



- VII. Una vez transcurrido el tiempo, se extrae el crisol y se lo deja reposar en el desecador hasta que se enfríe.
- VIII. Se pesa papel filtro, se repite el ensayo para todas las muestras.
- IX. Se calcula los sólidos suspendidos mediante la siguiente ecuación:

$$SS = \frac{Peso\ final\ papel - Peso\ inicial\ papel\ [mg]}{0.05\ [L]} \quad (2.2)$$

Procedimiento tomado de (WEF, 2017)

### 2.2.3 Medición de pH, Oxígeno disuelto (OD) y Turbidez

Como el Laboratorio de Aguas de la ESPOL cuenta con multiparámetros, es decir equipos especializados para realizar mediciones de campo, se pudieron realizar las mediciones de forma inmediata. Se utilizó el multiparámetro **HACH HQ40D**, el cual tiene adaptación para sondas de medición de pH, turbidez y oxígeno disuelto. Se tomaron alícuotas de 300mL donde se depositaron en un recipiente estéril.

De acuerdo al modelo del multiparámetro se detalla a continuación las especificaciones de lectura:

**Tabla 2.5 Rango y precisión de lectura del multiparámetro HACH HQ40D (HACH, Latam HACH, 2019)**

Parámetro	Rango de lectura	Precisión de lectura
pH	0,0 – 14,0 pH	±0,01 pH
OD	0,00 – 20,00 ppm	±3% de la lectura

En cuanto a la medición de turbidez se utilizó el turbidímetro portátil 2100Q, donde sus especificaciones se muestran a continuación:

**Tabla 2.6 Rango y precisión de lectura del turbidímetro HACH portátil 2100Q (HACH, Es HACH, 2019)**

Parámetro	Rango de lectura	Precisión de lectura
Turbidez	0 – 1000 NTU	±2% de la lectura

#### 2.2.4 Medición de DBO y DQO

Los ensayos de DBO y DQO se realizaron en el laboratorio “Marcos”. Por motivos de logística se contrató el servicio de análisis que brinda el laboratorio. Los resultados esperados siguen las siguientes unidades:

**Tabla 2.7 Precisión de la lectura para DBO y DQO proporcionada por el laboratorio**

Parámetro	Unidad	Precisión de lectura
DBO	mg/L / ppm	±2% de la lectura
DQO	mg/L / ppm	±0.5% de la lectura

#### 2.2.5 Ensayo de Granulometría

El ensayo que se realizó consta de dos partes, la primera fue la extracción de la muestra sólida proveniente del tanque de homogeneización, la segunda fue el ensayo de distribución de partícula, mediante un conjunto de tamices y un agitador mecánico. Los ensayos se realizaron con el equipo de tamizado del laboratorio de Medio Ambiente 1 de la ESPOL.

##### 2.2.5.1 Obtención de la muestra

Se extrajeron los sólidos (fragmentos de plástico residuales) con un filtro de tela de  $20\mu m$ , donde posteriormente se los dejó secando al ambiente por un periodo de 72 horas. No se utilizó una estufa debido que las elevadas temperaturas inducen a la dilatación del plástico y el ensayo no sería efectivo.

##### 2.2.5.2 Ensayo de distribución de partícula

Se tomaron 5 muestras de aproximadamente 150g cada una. Se pesaron en la balanza analítica y se depositaron en el conjunto de tamices. Los tamices a utilizar fueron de 5, 10, 18, 25 y 35 del modelo ASTM. Se procedió a llevar a agitación el sistema armado por 15 minutos para favorecer la separación. Una vez pasado el tiempo se sacó el material sólido separado y se procedió a pesar y clasificar los pesos de acuerdo al número de tamiz que lo retuvo.

Seguido se realizó la tabla de distribución de datos la cual se estructura de la siguiente forma:

**Tabla 2.8 Registro de distribución de partícula**

Peso muestra [g]	Masa retenida [g]						%Pérdida
	Tamiz 5	Tamiz 10	Tamiz 18	Tamiz 25	Tamiz 35	Más pequeñas	
	4mm	2mm	1mm	710 um	500 um	500 um<	
-	-	-	-	-	-	-	-

Donde el porcentaje de pérdida se refiere a la diferencia entre el peso previo al ensayo y la sumatoria de todos los pesos retenidos en el tamiz, sobre el peso inicial. Siguiendo la siguiente ecuación:

$$\%Pérdida = \frac{\text{Peso inicial} - \sum_{i=5}^{35} \text{Peso en el tamiz "i"}}{\text{Peso inicial}} * 100\% \quad (2.3)$$

Una vez ordenado los datos se procedió a realizar la tabla de %paso en función de la abertura del tamiz [ $\mu m$ ], para poder graficar la curva granulométrica (no a escala logarítmica). (RUA, 2008) Para poder realizar la tabla se utilizó el software "Microsoft Excel 2016" el cual posee la herramienta de realizar cálculos dentro de las celdas, así mismo cuenta con funciones para sacar porcentajes y promedios de los datos tabulados y brinda la facilidad de realizar una gráfica e interpolar en la misma. La tabla de distribución de partículas se muestra a continuación junto con las ecuaciones empleadas.

**Tabla 2.9 Cálculos requeridos para determinar la retención de partícula por tamaño de tamiz (RUA, 2008)**

Denominación	Abertura [um]	Masa retenida [g]	% Retenido	%Retenido acumulado	%Paso
Tamiz 5	4000	C3	$D3 = \frac{C3}{\sum_{i=3}^8 Ci} * 100$	R3= D3	100-R3
Tamiz 10	2000	C4	$D4 = \frac{C4}{\sum_{i=3}^8 Ci} * 100$	R4=D3+D4	100-R4
Tamiz 18	1000	C5	$D5 = \frac{C5}{\sum_{i=3}^8 Ci} * 100$	R5=D4+D5	100-R5
Tamiz 25	710	C6	$D6 = \frac{C6}{\sum_{i=3}^8 Ci} * 100$	R6=D5+D6	100-R6
Tamiz 35	500	C7	$D7 = \frac{C7}{\sum_{i=3}^8 Ci} * 100$	R7=D6+D7	100-R7
Base	500<	C8	$D8 = \frac{C8}{\sum_{i=3}^8 Ci} * 100$	R8=D7+D8	
TOTAL		$\sum_{i=3}^8 Ci$			

Donde finalmente se grafica el %Paso en función de la abertura del tamiz.

### 2.3 Diseño de unidades propuestas para el pretratamiento para la PTAR

#### 2.3.1 Diseño de la Criba

##### 2.3.1.1 Consideraciones de diseño para construcción de la criba.

Dos factores son fundamentales previo al diseño de un sistema de cribado, el primero es el tamaño de apertura de la rejilla y el segundo es la pérdida de carga producida por el paso del agua. (Calleja, García, de Lucas, Prats, & Rodríguez, 1999)

##### 2.3.1.1.1 Pérdida de carga

La pérdida de carga se encuentra en función del caudal del fluido y la velocidad aproximada del agua a la salida de la rejilla (Costa, y otros, 1985). La pérdida de carga se puede aproximar mediante la siguiente ecuación:

$$\Delta h = k \left( \frac{v^2 - v'^2}{2g} \right) \quad (2.4)$$

Donde

- $\Delta h$  es la pérdida de carga (m)
- $k = 1/0.7$  es el coeficiente empírico donde se aproxima la pérdida por turbulencias
- $V$  es la velocidad del flujo previo al contacto con la reja (m/s)
- $v$  es la velocidad aproximada del fluido a la salida de la reja (m/s)
- $g = 9.8 \text{ m/s}^2$  es la aceleración por gravedad

Cabe resaltar que la pérdida calculada solo es aplicada cuando las rejillas se encuentran limpias. Caso contrario la pérdida de carga aumenta por obstrucción de paso.

Como la obtención de la velocidad del fluido a la salida de la criba, se utiliza la ecuación alterna de la pérdida de carga, en función de sus coeficientes (Gutiérrez, 2007)

$$\Delta h = k_1 k_2 k_3 \left( \frac{V^2}{2g} \right) \quad (2.5)$$

Donde

- $k_1$  es coeficiente de atascamiento (cuando la rejilla está limpia  $k_1 = 1$ )
- $k_2$  es el coeficiente de acuerdo al tipo de barrote. (para tamiz rectangular  $k_2 = 0.1$ )
- $k_3$  es el coeficiente de paso entre barros. (Revisar apéndice, donde se especifica el valor de  $k_3$ )

### 2.3.1.1.2 Dimensionamiento

Para determinar el tamaño de abertura de la criba se utilizó el análisis de distribución de partícula, con la finalidad de retener la mayor cantidad de sólidos

posibles sin obstruir la criba. Como en la industria recicladora poseen una malla de acero inoxidable de 1.8mm de abertura, se estima que se retendrá el 75% de sólidos presentes en el agua.

Una de las peticiones del gerente de la planta fue la recuperación del material sólido debido que este puede ser implementado como plástico para formación de pellets si es secado y reenviado a la planta recicladora, es por ello que dentro del diseño está incluido la zona de recuperación, donde el material retenido es transportado hacia una tula, donde se almacenará el material retenido. Para evitar la obstrucción, el diseño presenta una inclinación por parte de la zona de cribado, donde además de evitar obstrucciones, favorece el desplazamiento de los sólidos residuales hacia su almacenaje.

El modelo de la criba es un “*Tamiz fijo estático*” el cual debe cumplir los rangos recomendados de diseño:

**Tabla 2.10 Parámetros de diseño para una criba – Tamiz (Conagua)**

Concepto	Rango	Comentarios
Tamiz fijo estático (rejilla fina)	0.5 a 2mm	Utilizada para pre tratamiento
Velocidad de aproximación	0.20 – 0.60 m/s	
Pérdida de carga admisible	Aproximado a 0	
Pérdidas típicas	300 – 450 mm	En canal abierto
Pendiente en relación a la vertical (grados)	25 - 50	En canal abierto

Se debe tomar en consideración las características propias del diseño como:

- Tipo de sección de la criba (rectangular)
- Dimensiones de la superficie de la criba (propuesto)
- El gasto, considerando para un día de trabajo
- Pendiente de la conducción

La velocidad de flujo previo a la criba se obtuvo por la ecuación de relación caudal /área de salida, la cual se describe a continuación:

$$V = \frac{Q [m^3/h]}{A [m^2]} \quad (2.6)$$

Con la segunda ecuación de pérdida de carga se estima la superficie de mojado, el cual fue el indicativo para el cálculo de la superficie de la criba (EPA, 2011).

$$\Delta h = \frac{1}{c(2g)} \left( \frac{Q}{A} \right)^2 \quad (2.7)$$

Donde, despejando "A" queda:

$$A = \sqrt{\frac{1}{c(2g)} Q^2 \frac{1}{\Delta h}} \quad (2.8)$$

Donde:

- $A$  es el área de superficie de mojado
- $C$  es el coeficiente del tamiz (adimensional) (0.6)
- $g$  es la gravedad ( $m/s^2$ )
- $Q$  es el caudal del fluido que pasa por el tamiz
- $\Delta h$  es la pérdida de carga (m/s)

### 2.3.2 Diseño del hidrociclón

Un hidrociclón es un equipo encargado de la remoción de material en suspensión de un fluido. Presenta ventaja sobre los sistemas de separación mecánico debido que requiere bajos costos de operación y su sistema de separación es eficiente. Por los motivos mencionados con anterioridad se escogió el hidrociclón, debido que se busca retener las partículas sólidas restantes (APC, 1998).

Los principales parámetros a considerar para el diseño del hidrociclón son los siguientes:

- Tamaño de partícula de los sólidos
- Caudal de la corriente de entrada
- Presión del fluido

- El punto de corte D50 que mide la eficiencia del ciclón

Donde el punto de corte se calcula con la ecuación de Coulson:

$$D_{50} = 4.5 \left[ \frac{D_c^2 \mu}{L^{1.2} (\rho_s - \rho_L)} \right] \quad (2.9)$$

Cuya nomenclatura se detalla:

- $D_{50}$  punto de corte ( $\mu m$ )
- $D_c$  diámetro de la cámara del ciclón ( $cm$ )
- $L$  Flujo de alimentación ( $L/min$ )
- $\mu$  viscosidad del líquido (*Centipoise,  $mN \cdot s/m^2$* )
- $\rho_s$  densidad del sólido ( $g/cm^3$ )
- $\rho_L$  densidad del líquido ( $g/cm^3$ )

Como no se desconocía el diámetro de la cámara del ciclón, se estimó el punto de corte por medio de ecuaciones empíricas:

$$D_{50} \text{ O/F } 60\% \text{ por paso} = k * (\text{O/F } 60\% \text{ paso}) \quad (2.10)$$

Donde:

- $(D_{50} \text{ O/F } 60\% \text{ por paso})$  es el punto de corte para el paso del 60% de partículas ( $\mu m$ )
- $(\text{O/F } 60\% \text{ paso})$  es el tamaño de partícula en el "overflow" para el paso del 60% de partículas ( $\mu m$ )
- $k$  es un factor de corrección adimensional ( $k=2.08$ )

Así, se estimó el valor con la ecuación de punto de corte en función de los factores de corrección:

$$D_{50} = \frac{(D_{50} \text{ O/F } 60\% \text{ por paso})}{C_1 C_2 C_3} \quad (2.11)$$



Considerando:

- $C_1$  es el factor de corrección por densidad de la alimentación
- $C_2$  es el factor corrección por influencia de caída de presión
- $C_3$  es el factor de corrección por sólidos

Conociendo el punto de corte se calcula el diámetro del ciclón:

$$\text{Diámetro del ciclón (inch)} = 0.393701 \left( \frac{D_{50}}{2.84} \right)^{\frac{1}{0.66}}$$

(2.12)

Con el diámetro del ciclón se obtienen sus proporciones, tal como se muestra en la figura y en la tabla resumida:

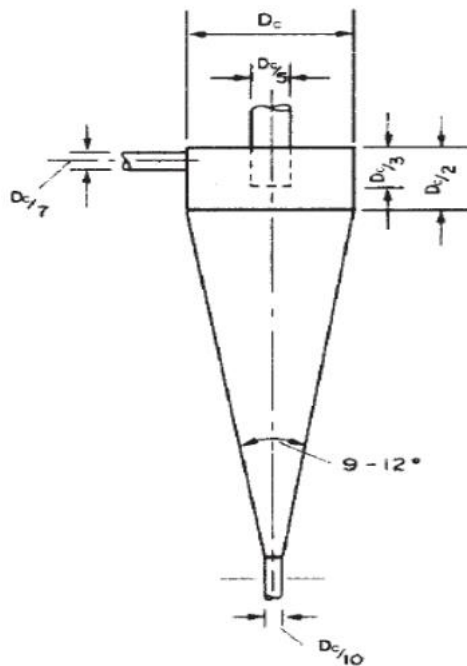


Figura 2.1 Dimensiones de un hidrociclón (APC, 1998)

**Tabla 2.11 Proporciones del hidrociclón en función del diámetro de la cámara de alimentación (APC, 1998)**

Tabla de proporciones	
Diámetro del hidrociclón	$D_c$
Diámetro de la boquilla de entrada	$D_c/7$
Diámetro del ápice	$D_c/10$
Diámetro de la salida del "overflow"	$D_c/5$
Longitud de la cámara cilíndrica	$D_c/2$

## 2.4 Análisis post – tratamiento primario

Los análisis se realizaron con muestras tomadas después del pretratamiento, debido que los sólidos presentes representaban baja eficiencia en la reacción porque desfavorecían el contacto entre los reactivos, para determinar las propiedades del agua después del tratamiento primario fue necesario remover los sólidos sedimentables con ayuda del floculante y coagulante y posteriormente separar el sedimento de la parte líquida. Para ello se evaluó mediante el test de jarras donde no solo se dosificó lo establecido por el manual de la planta, también se indagó aumentando la dosis en un 5%, 10% y 15% tanto de floculante como de coagulante.

### 2.4.1 Ensayo de % de remoción "Test de Jarras"

Para desempeñar el ensayo, se requirieron los siguientes materiales, reactivos y equipos:

**Tabla 2.12 Materiales, equipos y reactivos necesarios para elaborar un "Test de Jarras"**

Materiales	Reactivos	Equipos
Probeta 1000mL	HIMOLOC DR 300 Floculante	Test de jarras
Pipeta 10mL	HYGREEN KT2533 Coagulante	
Pera		
2 Probetas 250 mL		
Cronómetro digital		

#### 2.4.1.1 Floculante HIMOLOC DR 300

La serie Himoloc Dr distribuye floculantes catiónicos, de acuerdo a sus especificaciones son efectivos en un amplio rango de pH. Una de sus ventajas es que puede funcionar de forma individual o en conjunto con otros productos, de acuerdo a lo que el cliente especifique. Aunque la gama de productos floculantes es amplia, el Himoloc DR 3000 está especializado para tratamiento con efluentes donde el tratamiento primario se lleva a cabo por flotación.

El producto cuenta con las siguientes características:

**Tabla 2.13 Propiedades físico – químicas del Floculante (Derypol, Himoloc: Polímeros Petróleo, 2015)**

Producto	Aspecto	Densidad	Viscosidad	pH	Cationicidad	Peso molecular
Himoloc DR300	Líquido blanco lechoso	$\sim 1.2 \frac{g}{cm^3}$	$< 600cp$	3.0 – 4.1	Media	Alta

#### 2.4.1.2 Coagulante HYGREEN KT2533

Es catalogado como un coagulante vegetal, con la finalidad de cubrir su función sin realizar daños al medio ambiente. Tiene las siguientes características:

**Tabla 2.14 Propiedades físico – químicas del coagulante (Derypol, Productos para la depuración de aguas residuales, 2015)**

Producto	Aspecto	Densidad	Viscosidad	pH
Hygreen KT2533	Sólido blanco	$\sim 1.02 - 1.10 \frac{g}{cm^3}$	$< 7000cp$	2.0 – 3.0

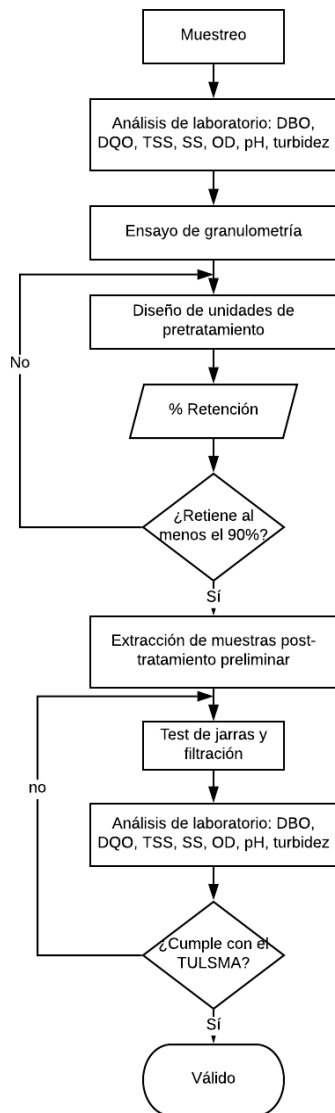
Procedimiento.

- I. Se coloca en cada jarra 1L de la muestra post tratamiento preliminar.
- II. Se dosifica las diferentes dosis en cada jarra. Para la primera se añade 2.16mL de solución de coagulante (15g de floculante con 900mL de agua), se agrega 1.5mL adicional por cada jarra,
- III. Se dosifica 0.48 mL de solución de floculante (1000g de floculante en 500g de agua). Se añade 0.5mL adicional por cada jarra
- IV. Se realiza la agitación a 150rpm por un minuto,
- V. Pasado el minuto la agitación baja a 50rpm por 30 minutos.
- VI. Se fija la dosis óptima, con mayor formación de sedimentos,

Procedimiento obtenido de (Lozano, 2013)

## **2.5 Validación de la propuesta**

Una vez se realizó el ensayo de remoción, se separó la parte líquida de la parte sólida. Nuevamente se sacaron muestras de la parte líquida para hacer ensayos de laboratorio y medir los niveles de DBO, DQO, SS, OD, Turbidez y pH. Fue necesario hacer el análisis, debido que después del tratamiento primario los sólidos sedimentables presentes como materia orgánica son separados de la masa acuosa. Los niveles de DQO, DBO y SS disminuyen pero para validar la efectividad del tratamiento fue necesario comparar con los niveles permitidos para descargas industriales estipulados por el Texto Unificado de Legislación Secundaria del Medio Ambiente, en el anexo 1 del sexto libro. Los niveles de contaminación dentro del rango estipulado por el TULSMA fue el indicativo para validar nuestro proyecto. En resumen, nuestro estudio se puede simplificar con el siguiente diagrama de flujo



**Figura 2.2 Diagrama de validación –  
Elaborado en LUCIDCHART**

## 2.5.1 Estimación de costos

### 2.5.1.1 Costos de equipos

Para la estimación de costos de equipos se consideraron los que la propuesta implementó, es decir la criba y el hidrociclón. A los soldadores y mecánicos de la empresa se les encomendó la tarea de construir los equipos, es por ello que el costo se resume a materiales y energía necesaria para ensamblaje del equipo.

**Tabla 2.15 Ecuaciones de costos**

Costo de equipos	
Materiales	$Costo_m = Precio\ unitario\ material * unidades$
Mano de obra individual	$Costo_t = Horas\ de\ trabajo\ fijas * salario$
Costo de mano de obra total	$Costo_t = Horas\ de\ trabajo\ fijas * salario$
Costo por insumo energético	$Costo_E = horas\ de\ trabajo * kWh\ costo\ kWh$
TOTAL	$Costo_T = Costo_m + Costo_{to} + Costo_E$

### 2.5.1.2 Costos de instalación

Además del costo de adquisición se debe tomar en cuenta los costos por parte de:

- Instrumentación
- Estructuras
- Aislamiento y pintura

Es por ello que para estimar el costo global que requiere la instalación de un equipo se utiliza el factor de instalación, el cual también es conocido como factor de Lang (Sinnott, 2007).

$$Costo\ Instalación = (\sum Costo\ de\ los\ equipos) * F$$

(2.13)

Donde:

F es el factor de Lang el cual puede tomar los siguientes valores:

- F=3.1 para procesamiento de sólidos
- F= 4.74 para procesamiento de fluidos
- F= 3.63 para procesamiento de fluidos y sólidos mixtos

### 2.5.2 Flujo de caja

Se desarrolló el flujo de caja, considerando la inversión por los costos de adquisición e instalación. Así mismo se considera que los ingresos son el ahorro que la empresa adquiere por disminución de uso de agua para realizar retro lavados en los filtros. Se consideró que la inflación influye tanto en ingresos, costos, gastos, y depreciación. Por facilidad se estimó la depreciación como depreciación lineal con respecto al tiempo. Para estimar la “Tasa mínima aceptable de rendimiento” (TMAR) se utilizó la siguiente ecuación :

$$TMAR = i + ri$$

(2.14)

Donde

- $i$  es la tasa de inflación
- $ri$  rerepresenta el riesgo de la inversión

Como la inflación es un factor que afecta la TMAR (FCS, 2014), se debe realizar la corrección:

$$TMAR\ mixta = i + TMAR + (i * TMAR)$$

(2.15)

Donde

- $i$  es la tasa de inflación
- $TMAR$  es la tasa mínima aceptable de rendimiento

En cuanto a la estimación de la depreciación (James & Wachowicz, 2001):

$$DL = \frac{B}{n}$$

(2.16)

Donde

- $DL$  es la tasa depreciación lineal
- $B$  es el valor inicial del bien
- $n$  es la vida útil representada en años

Para el cálculo del Flujo Neto de Efectivo (FNE), Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR) se utilizó las funciones financieras de Microsoft Excel 2016.



# CAPÍTULO 3

## 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

### 3.1 Evaluación previa de la PTAR

Tabla 3.1 Análisis previo al rediseño de la PTAR

Resultados del análisis de entrada y salida de la PTAR previo al rediseño									
Parámetro	Unidad	Ensayos Entrada			Promedio Entrada	Ensayos Salida			Promedio Salida
pH	-	8.1	7.8	7.8	7.9	6.5	6.37	6.39	6.42
SST	ppm	23275	23225	23250	23250	15665	16690	14670	15675

Se puede evidenciar un muy bajo porcentaje de remoción y una muy alta concentración de SST a la salida de la PTAR, por lo que se comprueba la opción de un mejoramiento en la PTAR.

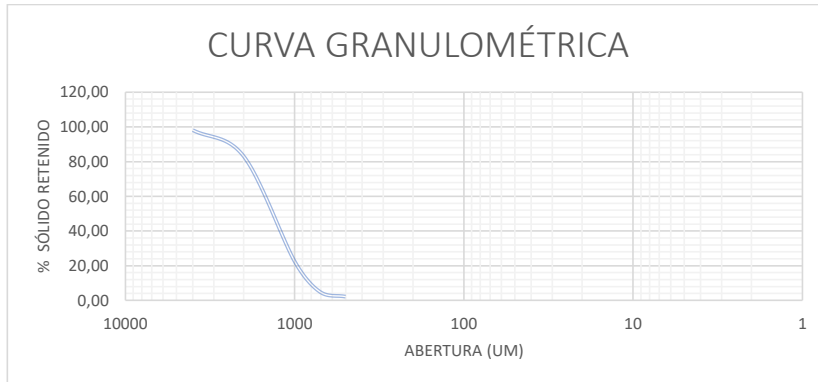
### 3.2 Criba

#### 3.2.1 Ensayo de Granulometría

Se realizaron 5 ensayos diferentes de la cual se obtuvo el promedio respectivo, para realizar el análisis.

Tabla 3.2 Resultados de ensayo de granulometría

Denominación	Abertura [um]	Promedio Masa retenida [ g ]	%Retenido	% Retenido acumulado	% Pasa
Tamiz 5	4000	3.31	1.95	1.95	98.05
Tamiz 10	2000	25.55	15.05	17.00	83.00
Tamiz 18	1000	102.67	60.49	77.49	22.51
Tamiz 25	710	29.71	17.50	94.99	5.01
Tamiz 35	500	4.80	2.83	97.82	2.18
Base	500<	3.69	2.18	100	
TOTAL		169.73	100		



**Figura 3.1 Curva Granulométrica**

Al realizarse el ensayo de granulometría se evidenciaron algunas partículas de gran tamaño a simple vista que superan los 4cm, mientras que de acuerdo a los datos obtenidos y su respectiva gráfica se puede decir que el tamiz 18, cuenta con el mayor porcentaje de retención para las partículas, correspondiente a una abertura de 1000µm, por ende se tomó en consideración esta medida para el diseño de la criba a utilizarse en el pretratamiento.

### 3.2.2 Dimensionamiento de la criba

De acuerdo a los cálculos, las dimensiones en la criba se hallaron en función de la pérdida de carga para cribas y la velocidad del flujo a la entrada

**Tabla 3.3 Factores de Importancia de la Criba**

Parámetro	Valor
Velocidad a la entrada	$0.245 \frac{m}{s}$
Pérdida de carga	$0.000030625m$
Área de superficie de mojado	$0.1465m^2$

De acuerdo a la Tabla 2.1 la inclinación de la criba debe encontrarse en un rango de 20°-50° con respecto a la horizontal para evitar la saturación.

La propuesta de diseño tiene las siguientes características:

- Área de contacto (rejilla de 1.5mm de abertura): ancho 0.6m, largo 0.8m.
- Inclinación de la criba 30°- 45°, ajustable.
- Dimensión total de la criba: ancho 1.0m, 1.0m de largo y 0.5m de altura. Formando una caja abierta hacia abajo, donde la parte inferior es utilizada como zona de desfogue.

### 3.2.3 Configuración de la instalación

- Criba elevada 1.5m por encima del tanque de homogenización
- Sostenida por 4 soportes, los cuales se encuentran forjados a los barandales del tanque.

Cuando se usan rejillas tipo "tamiz" en lugar de rejas de mayor tamaño, la pérdida de carga es casi despreciable, es por ello que se lo considera en muchas ocasiones nula. Sin embargo, es un factor importante para el diseño, debido que la superficie de mojado se encuentra en función de la pérdida de carga. Si bien es cierto, aunque la superficie teórica fue de  $0.1465m^2$  la superficie real de mojado es de  $0.48m^2$  debido que por acumulación se puede producir rebose de fluido y obstrucción en la criba.

### 3.2.4 Evaluación del resultado de la criba

Tabla 3.4 Resultados del análisis a la salida de la criba

Parámetro	Unidad	Concentración
pH	-	7.8
SST	ppm	1005
DQO	mg/L	1990
DBO	mg/L	379
OD	mg/L	0.43
Conductividad	us/cm	2.63
Turbidez	NTU	425

De acuerdo a la siguiente ecuación se calculó el porcentaje de retención de la criba de acuerdo a los sólidos en suspensión.

$$\% \text{ retención} = \frac{SST \text{ antes} - SST \text{ despues}}{SST \text{ antes}} * 100\% \quad (3.1)$$

$$\% \text{ retención} = \frac{SST \text{ antes} - SST \text{ despues}}{SST \text{ antes}} * 100\% = 95.67\%$$

A pesar de que el agua luego de pasar por la criba cuenta con una alta concentración de SST, la eficiencia de la criba se puede ver en el % de retención. El porcentaje es de 96%, eso quiere decir que la criba es altamente eficiente. Uno de nuestros objetivos es disminuir la carga por parte de sólidos presentes en el agua que se va a tratar. Como se puede observar, el porcentaje de retención superó al esperado 90%, de esta forma los cálculos previos quedan validados para un diseño eficaz.

### 3.3 Hidrociclón

#### 3.3.1 Dimensionamiento del hidrociclón

Previo a los cálculos de dimensionamiento se realizó un balance de materia, donde se fija el 90% de retención de sólidos residuales (Apéndice A), de esto se fijaron los requerimientos del modelo:

**Tabla 3.5 Requerimientos del modelo del hidrociclón**

<b>Requerimientos de modelo</b>	
O/F Tamaño al 60% de paso	<b>43 um</b>
O/F (Overflow) %Sólidos	<b>0,009054</b>
U/F (Underflow) %Sólidos	<b>44</b>
S.G. de los sólidos	<b>1,25</b>
Carga circulante aproximada	<b>300 %</b>
Presión de operación	<b>82,7</b>

Una vez fijado los requerimientos, se realizó el balance de materia:

**Tabla 3.6 Balance de materia para el hidrociclón**

	Overflow	Underflow	Feed
<b>MTPH Sólidos</b>	0,0009038	0,0081340	0,0090378
<b>MTPH Agua</b>	9,9809671	0,0104353	9,9909600
<b>MTPH Lodos</b>	9,9818708	0,0185694	9,9999978
<b>% sólidos, wt</b>	0,0090542	44,0000000	0,0903780
<b>% sólidos, vol</b>	0,0072435	38,0000000	0,0723155
<b>S.G. del lodo</b>	1,5070000	1,9920000	1,6210000
<b>Flujo de lodos (l/s)</b>	1,8399080	0,0025894	1,7136190
<b>USGPM lodos</b>	29,00000	0,0410435	27,0000000

Donde el punto de corte para la retención del 60% de partículas fue:

$$D_{50} \text{ O/F } 60\% \text{ por paso} = 2.08 * 43 \mu\text{m} = 89 \mu\text{m}$$

El diámetro de la cámara de alimentación del ciclón se determinó en función del punto de corte, el cual se encuentra en función de los factores de corrección para densidad, caída de presión y sólidos (valores desarrollados en el apéndice)

**Tabla 3.7 Factores de corrección**

C1, Corrección de la densidad de la alimentación	<b>1,00</b>
C2, Corrección por influencia de caída de presión	<b>0,90</b>
C3, Corrección por sp gr sólidos	<b>2,57</b>
D50 <sub>c base</sub> (μm)	<b>36,00</b>
diámetro del ciclón (inch)	<b>18,66</b>
Área de la boquilla de entrada (inch <sup>2</sup> )	<b>17,40</b>
Longitud del vórtice (inch)	<b>6,53</b>

De acuerdo a la Tabla 2.11 se estableció que las dimensiones del hidrociclón deben ser las siguientes:

**Tabla 3.8 Dimensiones finales del hidrociclón**

Dimensiones del hidrociclón	
Diámetro del hidrociclón	18,66 inch

Diámetro de la boquilla de entrada	2,67 <i>inch</i>
Diámetro del ápice	1,87 <i>inch</i>
Diámetro de la salida del "overflow"	3,73 <i>inch</i>
Longitud de la cámara cilíndrica	9,33 <i>inch</i>

Las dimensiones y la capacidad fueron indicativos para determinar las unidades requeridas.

**Tabla 3.9 Resultados del dimensionamiento**

Rendimiento real de un solo ciclón de este tamaño (USGPM)	<b>900</b>
Número de ciclones requeridos	<b>0,03880</b>
Underflow por unidad (USGPM)	<b>1</b>
Tamaño del ápice (inch)	<b>4,25</b>

Es importante considerar que, para remover el 90% de las partículas residuales solo se necesita un hidrociclón. Este debe estar construido de acuerdo a las dimensiones establecidas. Los hidrociclones se encuentran diseñados para remover partículas sólidas en gran proporción dispersas en un fluido, para ello se aprovechan de la fuerza centrípeta que se genera en el interior de la cámara de alimentación.

Como se puede visualizar, el flujo másico con el cual opera la PTAR es de 10 Toneladas por hora, es decir el flujo de entrada es bajo en comparación con el flujo másico con la que opera una planta de refinación de minerales. Es pertinente realizar la comparación, debido que en el proceso de refinación de minerales es necesario un hidrociclón para minimizar las pérdidas por lavado. Así mismo, como opera con grandes cargas másicas se necesitan varios hidrocilones ubicados en serie, sin embargo ese no fue nuestro caso. Nuestro interés no fue recuperar el plástico residual, debido que es complicado darle un nuevo uso o utilizarlo como material reciclable, más bien fue extraer el plástico residual para disminuir la saturación en los filtros de la PTAR.

La implementación de un solo hidrociclón contribuye a la retención de partículas de menor tamaño, aunque aún quedan partículas residuales estas pueden ser

extraídas fácilmente por aglomeración de flocúlos en el tratamiento primario. Para desempeñar su trabajo, el hidrociclón solo ocupa el 3.88% de su capacidad total, es decir que si la empresa recicladora decide aumentar la capacidad de su planta lo puede hacer sin necesidad de comprar o construir otro hidrociclón.

### 3.4 Floculación y coagulación

#### 3.4.1 Ensayo de “Test de Jarras”

Para decidir la dosis optimas se tomó en cuenta la turbidez y el tamaño de floculo que se observa y evalúa cualitativamente según las características a razón del índice de floculación de Willcomb, ya que son los parámetros más importantes para decidir la dosis optima a utilizarse (Gutiérrez, 2007).

**Tabla 3.10 Índice de Floculación de Willcomb (Alboleda Valencia, 2008)**

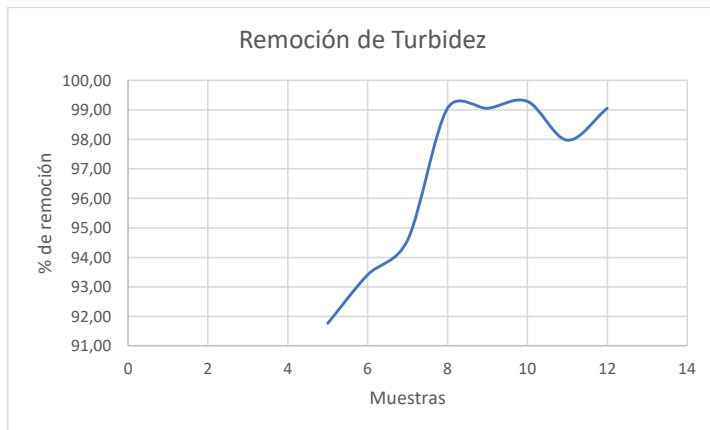
Número del índice	Descripción
0	Floculo coloidal. Ningún signo de aglutinación.
2	Visible. Floculo muy pequeño, casi imperceptible para un observador no entrenado
4	Disperso. Floculo bien formado pero uniformemente distribuido. (Sedimenta muy lentamente o no sedimenta)
6	Claro. Floculo de tamaño relativamente grande pero que precipita con lentitud
8	Bueno. Floculo que se deposita fácil pero no completamente.
10	Excelente. Floculo que se deposita completamente dejando el agua cristalina.

Las dosis de coagulante y floculante, se varió de doce formas diferentes para muestras de agua de 1L, obteniendo los siguientes resultados:

**Tabla 3.11 Resultados de Prueba de Test de Jarras**

Muestra	Coagulante (mL)	Floculante (mL)	Turbidez (NTU)	% Remoción Turbidez	Tamaño del Flog Willcomb	Volumen Lodos (cm3)	% Lodos (v/v)
1	2,16	0.48	13	96.94	4	39.68	3.97
2	3,66	0.98	20	95.29	4	66.13	6.61
3	5,16	1.48	23	94.59	6	105.80	10.58
4	6,66	1.98	36	91.53	6	132.50	13.25

5	8,16	2.48	35	91.76	4	198.38	19.84
6	9,66	2.98	28	93.41	6	211.60	21.16
7	11,16	3.48	23	94.59	8	238.05	23.81
8	12,66	3.98	4	99.06	10	254.50	25.45
9	14,16	4.48	4	99.06	8	260.18	26.02
10	15,66	4.98	3	99.29	6	277.73	27.77
11	17,16	5.48	8.6	97.98	8	278.89	27.89
12	18,66	5.98	4	99.06	8	280.05	28.01



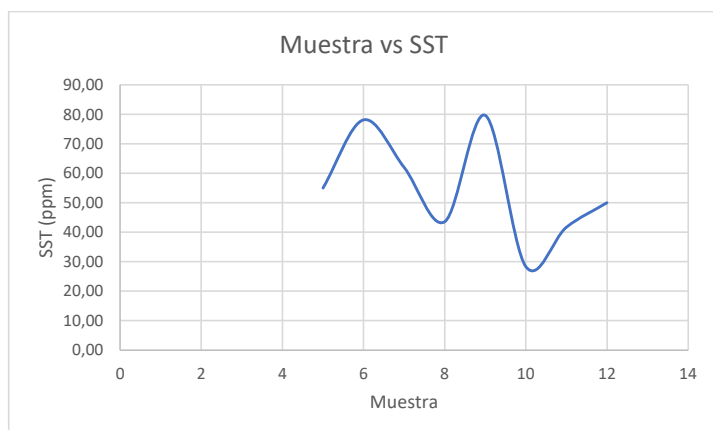
**Figura 3.2 Porcentaje de remoción**

De acuerdo al porcentaje de remoción y el tamaño del floculo según el índice de Willcomb, se opta por la muestra 8. Para verificar la selección de este, se descartó las 4 primeras muestras y se tomó otros parámetros de la muestra 8 a la 12.

**Tabla 3.12 Parámetros de comprobación**

Muestra	% Remoción Turbidez	pH	OD (mg O/L)	Conductividad (ms/cm)	SST (ppm)
5	91.76	6.36	4.33	3.22	55.00
6	93.41	6.67	2.21	3.34	78.13
7	94.59	6.65	1.9	3.42	62.00
8	99.06	6.52	4.7	3.56	43.55
9	99.06	6.12	2.4	3.89	79.66
10	99.29	6.25	2.19	3.78	28.33
11	97.98	6.23	2.32	3.86	41.67
12	99.06	6.14	3	3.98	50.00





**Figura 3.3 Variación de SST de acuerdo a la dosis**

Analizando los valores obtenidos de los ensayos de comprobación, y la gráfica de SST, se confirmó la validez de la dosis número 8, ya que tiene un bajo contenido de sólidos en suspensión, no se tomó la 10 ya que se aumentarían costos, y se obtendría un resultado casi idéntico, cabe recalcar que la muestra 8, fue la más rápida en la formación de flóculos.

### 3.5 Análisis financiero

#### 3.5.1 Costos e Ingresos

Los costos por parte de compra de equipos e instalación fueron considerados como “inversión” y los costos por operación y mantenimiento se los consideraron como costos fijos. En cuanto los ingresos se los estimó por el ahorro por consumo de agua al implementar la propuesta de rediseño. Estos se resumen en la siguiente tabla:

**Tabla 3.13 Estimación de costos e ingresos**

Costo de Equipos	\$ 3598.68
Costo de Instalación	\$13063.22
Inversión	\$13362.52
Costo de operación y mantenimiento (anual)	\$50.27
Ingreso anual (estimación)	\$6048.00

Como se puede visualizar el costo que instalación es mayor que el costo propio de los equipos, esto se debe a que son equipos de separación fijos y la instalación requiere recursos energéticos, materiales para su fijación, el costo de la mano de obra para la misma y los recubrimientos para proteger el material base.

### 3.5.2 Tasas fijas, valor de salvamento y depreciación.

La estimación de la TMAR fue evaluada con respecto a la inflación del presente año y el riesgo de la inversión por los equipos, cabe resaltar que la TMAR es establecida por el cliente, quien espera remuneración o ganancias a cambio de la inversión. En cuanto a la depreciación su estimación fue de forma lineal a través del tiempo, junto con un valor de salvamento del 25% de la inversión inicial.

Los datos para realizar los cálculos del valor actual neto fueron los siguientes:

**Tabla 3.14 Valores de interés para establecer un flujo de caja**

Depreciación	\$ 1336.25
Impuestos	40%
Valor de salvamento	\$ 3340.63
TMAR	6.12%
Inflación	0.54%
TMAR mixta con inflación	0.2567

### 3.5.3 Resultados del flujo de caja

**Tabla 3.15 Valor actual neto y Tasa interna de retorno**

<b>VAN</b>	<b>10205,6578</b>
<b>TIR</b>	<b>22%</b>

Los valores que podemos destacar para determinar la rentabilidad del proyecto son dos. El primero es el "Valor actual neto" el cual se ve plasmado como el ahorro a través del tiempo. Con una inversión de \$13362.52 dólares americanos la empresa se ahorra \$10205.68 dólares durante 7 años, donde se reguló el tiempo de vida útil de los equipos. Aunque el ahorro no es directamente un "ingreso", en un flujo de

caja se lo considera como una entrada la cual puede ser implementada en otras áreas de la empresa. Se tiene conocimiento que dentro de 5 años la empresa desea invertir en un secador rotatorio, entonces, invertir en unidades de tratamiento preliminar es una necesidad, ya que así disminuyen los costos de operación en la planta recicladora mejorando el capital de la empresa, favoreciendo las futuras inversiones.

El segundo valor a destacar es la “Tasa interna de retorno” el cual se determinó que es del 22%. La tasa nos indica que el proyecto es rentable, debido que supera la “tasa mínima aceptable de rendimiento”, es decir supera el porcentaje de rendimiento esperado por la empresa, el cual era de 6.14%.

### 3.6 Evaluación final de la PTAR

**Tabla 3.16 Resultados de ensayos finales**

Parámetro	Ingreso a PTAR	Previo al Rediseño	Luego del Rediseño		
		Salida de PTAR	Salida de la Criba	Post - test de jarras	Salida de PTAR
pH	7.9	6.42	7.8	6.52	6.5
Turbidez	-	430	425	4	2
DBO	mg O2/L	-	379	163	50
DQO	mg O2/L	-	1990	850	200
SST	23250	15675	1005	43.55	35

Con respecto a la Ecuación 3.1, se la puede tomar como eficiencia, de la cual podemos decir que la eficiencia de la planta previa al rediseño es:

$$Eficiencia = \frac{SST \text{ antes} - SST \text{ despues}}{SST \text{ antes}} * 100\% = 32.58\%$$

La eficiencia luego del rediseño de la planta de acuerdo a la remoción de sólidos en suspensión es:

$$Eficiencia = \frac{SST \text{ antes} - SST \text{ despues}}{SST \text{ antes}} * 100\% = 96.51\%$$

De acuerdo a los resultados hemos incrementado la eficiencia de la PTAR en un 63.98%. En la revisión de los resultados de análisis del agua de descarga de la PTAR según el TULSMA los parámetros finales cumplen con la norma vigente.

# CAPÍTULO 4

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1 Conclusiones

- Mediante la inspección general de la PTAR, se identificó que la unidad de tratamiento preliminar y el sistema de tratamiento primario se encuentran saturados e incluso no están en funcionamiento correcto, es por ello que ya no cumplen con su función específica. En los resultados se reflejó que el tratamiento primario de la PTAR solo puede remover el 31% de sólidos utilizando su máxima capacidad. El resto de sólidos sedimentables y no sedimentables prosiguieron a los filtros. Debido a lo antes mencionado, las unidades que requieren un rediseño se encuentran en el tratamiento preliminar y tratamiento primario.
- De acuerdo a los análisis previos realizados del agua de entrada y salida de la PTAR, se evidenció que las características físico químicas (Turbidez, sólidos suspendidos, DBO, DQO) del efluente no se encuentran dentro de los límites permisibles según el TULSMA, para la descarga de aguas residuales de tipo industrial.
- Las muestras de agua en el tanque de homogenización presentaban la misma cantidad de sólidos en el agua de salida de la planta de reciclaje. En pocas palabras no había un sistema de retención de sólidos de gran tamaño. Eso se visualiza mejor cuando se determinó que el ingreso del fluido presentaba 23250ppm. Debido a esto, un sistema de remoción de sólidos que opere de forma continua y represente bajo en costos de mantenimiento es la mejor alternativa para implementar en el rediseño.
- La instalación de una criba es una de las mejores alternativas cuando se busca retener sólidos de gran tamaño. Sin embargo, cuando se tratan de partículas menores a 1mm de diámetro una rejilla no es la mejor alternativa. Es por eso que

la opción más viable para el diseño de una criba que presente un tamiz en lugar de rejillas. Como se pudo observar en los cálculos, el porcentaje de remoción de sólidos supera el 90%, mostrando de esta forma que el sistema es eficiente

- La instalación de un hidrociclón es la alternativa más óptima si buscamos separar las partículas residuales (menor a 900 micras) con un bajo costo de operación. El hidrociclón se encuentra diseñado para retener el 90% de material particulado restante, esto significa que la siguiente etapa contará con una proporción menor de sólidos. La implementación de un hidrociclón representa una ventaja para la empresa, al menos por dos razones: La primera es que previene la saturación de los filtros de grava, arena fina y carbón activado. Esto se debe a que el material sobrante obstruye el espacio sobrante en el filtro, ocasionando que se deba realizar retro lavados para limpiar los filtros. Es importante considerar que por cada retro lavado se consume agua, consecuentemente se convierte en un gasto para la empresa. La segunda razón es que el hidrociclón en su funcionamiento rutinario solo ocuparía el 3.8% de su capacidad total, esto quiere decir que si la planta aumenta su capacidad no será necesario implementar más unidades de separación porque un solo hidrociclón puede cumplir su labor sin reducir su eficiencia.
- El rediseño del tratamiento primario de la PTAR es fundamental, debido que con los parámetros de operación anteriores no lograban producir lodos en la unidad de flotación. Con las nuevas dosificaciones de coagulante y floculante se forma 25.45% de volumen de lodos en relación al volumen del agua. De acuerdo a la comparación de la eficiencia antes y después del rediseño hemos logrado obtener un incremento en la eficiencia de la PTAR de un 63.93% con respecto a la remoción de partículas en suspensión. Por lo tanto, alterar las dosificaciones del coagulante y floculante incrementa la eficiencia del proceso sin necesidad de invertir en nuevos equipos que representarían gastos para la empresa.

- El proyecto de rediseño del tratamiento preliminar y primario de la PTAR es económicamente viable. Esto lo podemos visualizar en el análisis financiero realizado. Donde podemos destacar que la tasa interna de retorno es superior a la tasa mínima aceptable de rendimiento. Además de acuerdo al flujo de caja, la inversión es recuperada entre el año 2 y 3 después de la implementación del rediseño. El proyecto fue elaborado para 7 años de trabajo después de la implementación. Como constancia que el proyecto representa beneficios, después de 7 años calculamos su valor actual neto, el cual refleja que es de \$10205.67. El proyecto elaborado no solo representa una oportunidad de mejora, también ofrece un beneficio económico, si es implementado con los parámetros establecidos.
- Con respecto a los ensayos finales para la comprobación, el efluente de PTAR, cumplen con los requisitos del ministerio del ambiente, estando las características del agua tratada bajo los límites permisibles según el TULSMA, tenido un DBO de 50 mgO<sub>2</sub>/L, una DQO de 200 mgO<sub>2</sub>/L y 35 mg/L de SST.

#### **4.2 Recomendaciones**

- Para futuros estudios, la empresa recicladora de plásticos podría caracterizar sus lodos formados. Es de nuestro conocimiento que varias empresas caracterizan sus lodos para poder darles un uso o en su defecto poder comercializarlo a instituciones que lo necesiten. Sea que la empresa les de uso o no, es importante realizar el análisis de contenido de materia, puesto que si los lodos no tienen alguna utilidad estos deben ser llevados a un gestor ambiental. Es importante tener este punto en consideración, debido que con el tiempo la acumulación de lodos representará un problema para la empresa, puesto que no tendrán el espacio necesario para su almacenaje. Además el espacio que ocupan los lodos resultantes del tratamiento puede ser utilizado para la extensión de la planta si en algún momento se lo requiere.

- La empresa recicladora de plásticos tiene una oportunidad de ahorrar recursos por compra de etileno y polipropileno del reciclaje. Como se pudo visualizar, el plástico retenido es aproximadamente 20 gramos por cada litro de agua a la entrada. Como la PTAR trata aproximadamente 10 metros cúbicos de agua por hora, el plástico retenido es aproximadamente 20kg por cada hora. Lo ideal sería que los 20kg que se pueden separar se los pueda reutilizar en la empresa recicladora, de esta forma la formación de pellets es mayor. Sin embargo, vale la pena realizar un estudio para determinar dos factores: El primero es la cantidad de plástico útil que se lo puede reciclar y el segundo es el costo de inversión para una cámara de secado el cual pueda tratar el plástico para su reciclaje. Si al momento de realizar el análisis costo-beneficio resulta que es viable la alternativa la empresa puede ahorrarse importantes sumas de capital.
- Se debe realizar una evaluación de la eficiencia en los reactores. Esto se debe que, aunque se conoce la dosis óptima de suministro de floculante o coagulante no se conoce con que eficiencia los reactores operan. Realizar el análisis permite determinar cuál es la dosis real ideal para favorecer la formación de la mayor cantidad de lodos posibles. La evaluación debe incluir la termodinámica y la cinética de las reacciones, debido que dichos estudios nos revelarán las condiciones óptimas de operación, como el tiempo de residencia. Al estudiar la eficiencia de los reactores se puede determinar con facilidad cuanto es la cantidad de reactivos los cuales se pierden en el proceso. Como oportunidad de mejora se puede realizar un estudio de recuperación de reactivos si estos se encuentran en exceso o simplemente no reaccionan.
- Realizar ensayos de calibración en el sistema de inyección de aire en el DAF. Aunque la formación de lodos es la más óptima, para que el sistema de flotación sea eficiente se requiere que los flocs formados sean empujados hacia la parte superior del DAF para posteriormente aglomerarse y ser extraídos. Durante los primeros ensayos en el sistema de tratamiento primario pudimos notar que el sistema de inyección se encuentra



- La empresa debe renovar sus filtros de arena fina, grava y carbón activado. Puesto que la adquisición de estos equipos, han estado laborando de manera continua y no han sido renovados hasta la actualidad. Si bien es cierto, el retro lavado contribuye a la limpieza del filtro, más el carbón activado presenta micro poros los cuales se terminan saturando con el tiempo. Como la PTAR ha estado operando con una cantidad considerable de sólidos es de esperar que para este momento los filtros se encuentren sobre saturados. Es por ello que la propuesta de un nuevo sistema de filtros debe incluir dos etapas. La primera que es de arena fina grava las cuales se van a encargar de la retención de cualquier partícula fina que haya podido permanecer en el proceso, la segunda etapa debe estar formada así mismo de arena fina, grava y carbón activado. Este último permite la retención de partículas de menor tamaño las cuales le dan características de color y olor al agua. Una vez implementado los filtros nuevos se sugiere realizar retro lavados después de las dos semanas de operación, esto es un mantenimiento preventivo. Lo ideal es realizar la limpieza de filtros después de un tiempo aproximado de operación, no cuando se encuentren sobresaturados.

## BIBLIOGRAFÍA

- Acciona - Business as unusual. (2018). *Sostenibilidad para todos*. Obtenido de La importancia de reutilizar agua: <https://www.sostenibilidad.com/agua/la-importancia-de-reutilizar-el-agua/>
- Aguilar, M. I., Sáez, J., Lloréns, M., Soler, A., & Ortuño, J. F. (2002). *Tratamiento físico-químico de aguas residuales: Coagulación - Floculación*. Murcia: F.G. Graf S.L.
- Alboleda Valencia, J. (2008). *Teoría y práctica de la purificación del agua* (Tercera ed.). Mc Graw Hill.
- APC. (1998). *Development of Hydrocyclones for Use in Plastics Recycling - A Summary Report of Research Sponsored by the American Plastics Council*. Ohio: APC.
- Baca U, G., Cruz V, M., Cristóbal V, M. A., Baca C, G., Gutiérrez M, J. C., Pacheco E, A. A., . . . Obregón S, M. G. (2014). *Introducción a la Ingeniería Industrial*. México: Grupo Editorial Patria.
- Calleja, G., García, F., de Lucas, A., Prats, D., & Rodríguez, J. (1999). *Introducción a la Ingeniería Química*. Madrid.
- Codorchem Envitech. (Agosto de 2013). *Condorchem Envitech - Smart ideas for wastewater & air treatment*. Obtenido de Indicadores de Sostenibilidad Ambiental: <https://blog.condorchem.com/tag/huella-ecologica/>
- Conagua. (s.f.). *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Diseño de plantas de Tratamiento de aguas residuales municipales: Pretratamiento y Tratamiento Primario*. México DF: Conagua.
- Costa, E., Calleja, G., Ojevero, G., de Lucas, A., Aguado, J., & Uguina, M. (1985). *Ingeniería Química. Vol III. Flujo de Fluidos*. Madrid.
- Derypol. (2015). *Himoloc: Polímeros Petróleo*. Obtenido de <http://www.derypol.com/repositori/productos/docs/es/Himoloc%20Oil%20and%20Gas%20CAST.pdf>
- Derypol. (2015). *Productos para la depuración de aguas residuales*. Obtenido de <http://www.derypol.com/repositori/productos/docs/es/Tratamiento%20de%20Aguas.pdf>

- EPA. (2011). *Principles of Design and Operations of Wastewater Treatment Pond Systems for Plant Operators, Engineers, and Managers, Office of Research and Development National Risk Management Research Laboratory*. EPA/600/R-11/088.
- FCS. (2014). *Capacitate para el empleo*. Obtenido de Formulación y evaluación de proyectos: <https://cdn3.capacitateparaempleo.org/assets/4eqz4uo.pdf>
- Fibras y Normas de Colombia S.A.S. (2018). *Fibras y Normas de Colombia S.A.S.* Obtenido de <https://www.fibrasynormasdecolombia.com/terminos-definiciones/etapas-del-proceso-tratamiento-aguas-residuales/>
- Gutiérrez, A. (2007). *Cálculos Hidráulicos*. EOI.
- Gutiérrez, A. (2008). *Cálculos hidráulicos*. EOI.
- HACH. (2019). *Es HACH*. Obtenido de <https://es.hach.com/2100q-turbidimetro-portatil-epa/product-details?id=24930077421>
- HACH. (2019). *Latam HACH*. Obtenido de <https://latam.hach.com/medidor-multiparametrico-de-doble-entrada-para-laboratorio-hq440d-ph-conductividad-oxigeno-disuelto-optico-orp-e-ise/product-details?id=54617076897>
- James, V. H., & Wachowicz, J. (2001). *Fundamentos de administración financiera*. Pearson Education.
- Kwell. (2018). *Waste water treatment system*. Kwell Machinery.
- Lozano, W. (2013). *Calidad físicoquímica del agua: Métodos simplificados para su muestreo y análisis*. Bogotá: UPC.
- Mejías Barrios, Z. d. (2010). *Evaluación de las plantas de tratamiento de aguas residuales de las urbanizaciones el Tamarindo y el moriche*. Barcelona.
- Michaud, D. (2017). *911Metallurgist*. Obtenido de 911Metallurgist: <https://www.911metallurgist.com/blog/hydrocyclone-design-equations-and-sizing-parameters-calculations?fbclid=IwAR0Ja24HZ6xMlIleO4yziGeBK-Y54eYnad90rgovDMlcj-P2OjNGbzMV3wl>
- NTNU. (2012). *NTNU Det skapende universitet*. Obtenido de [http://folk.ntnu.no/magnehi/cepci\\_2011\\_py.pdf](http://folk.ntnu.no/magnehi/cepci_2011_py.pdf)
- Ramalho, R. S. (s.f.). *Tratamiento de Aguas Residuales*. Quebec: Reverté S. A.
- Rodas Hernández, J. E. (2017). PROPUESTA DE DISEÑO DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES CON DECANTACIÓN DE FLUJO

RADIAL PARA REDUCIR EL GRADO DE CONTAMINACIÓN DEL CUERPO RECEPTOR, DISTRITO DE YANTALÓ - MOYOBAMBA. *Universidad Nacional de San Martín*.

- Rodas, R. (2002). Curso Internacional Gestión Integral de Tratamiento de Aguas Residuales. *Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales*. Lima: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Calidad Ambiental. Obtenido de [https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/41228623/2002\\_Sistema\\_de\\_tratamiento\\_de\\_aguas\\_residuales.pdf?response-content-disposition=inline%3B%20filename%3DSistema\\_de\\_tratamiento\\_de\\_aguas\\_residuales.pdf&X-Amz-Algorithm=AWS4-HMAC-SHA256&X-Amz-Credential](https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/41228623/2002_Sistema_de_tratamiento_de_aguas_residuales.pdf?response-content-disposition=inline%3B%20filename%3DSistema_de_tratamiento_de_aguas_residuales.pdf&X-Amz-Algorithm=AWS4-HMAC-SHA256&X-Amz-Credential)
- Rodier, J. (1981). *Análisis de Aguas: aguas naturales, aguas residuales, agua de mar*. Barcelona: Omega.
- RUA. (2008). *Universidad de Alicante*. Obtenido de Universitat d' Alacant: [https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/10998/3/Pr%C3%A1ctica%20N%C2%BA%203%20\\_Granulometria%20I\\_.pdf#targetText=En%20esta%20pr%C3%A1ctica%20veremos%20las,estos%20mediante%20cedazos%20o%20tamices](https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/10998/3/Pr%C3%A1ctica%20N%C2%BA%203%20_Granulometria%20I_.pdf#targetText=En%20esta%20pr%C3%A1ctica%20veremos%20las,estos%20mediante%20cedazos%20o%20tamices).
- Sans Fonfría, R., & Ribas, J. d. (s.f.). *Ingeniería ambiental: Contaminación y tratamientos*. Barcelona: Marcombo Boixareu Editores.
- Sinnott, T. &. (2007). *Chemical Engineering Desig*. UOP.
- TULSMA. (2018). *Texto Unificado de Legislación Secundaria, Medio Ambiente*. Decreto Ejecutivo N°3516: Registro oficial edición especial No2.
- Unesco. (2003). *Agua para todos, agua para la vida*. Obtenido de Informe de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos en el Mundo: [https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000129556\\_spa](https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000129556_spa)
- WEF. (2017). *Standar Methods for the Examiation of water and wastewater 23rd Edition*. Washington DC: Water Environment Federation.

# APÉNDICE

## APÉNDICE A - CÁLCULOS

### Dimensionamiento de la criba

Velocidad del flujo a la entrada, usando la ecuación 2.5

$$V = \frac{10 [m^3/h]}{\frac{\pi}{4}(0.12)^2 [m^2]} * \frac{1h}{3600s} = 0.245 \frac{m}{s}$$

Las dimensiones de la superficie de la criba se calcularon en función de su pérdida de carga como se muestra a continuación:

$$\Delta h = 1 * 0.01 * 0.1 \left( \frac{(0.245 \frac{m}{s})^2}{2(\frac{9.8m}{s^2})} \right) = 0.000030625m$$

Donde las constantes

- $k_1 = 1$  ; debido que es la constante de obstrucción para una rejilla limpia.
- $k_2$  es el coeficiente de acuerdo al tipo de barroto. (para tamiz rectangular  $k_2 = 0.1$ )
- $k_3 = 0.01$

Para hallar la constante  $k_3$  se debe considerar el espacio libre entre barrotes "e", el espesor de las barras "d" y la altura sumergida de las barras "h" (Gutierrez, 2008)".

Con los datos mencionados se calculan dos coordenadas:

$$y = \frac{1}{4} \left( \frac{2}{e} + \frac{1}{h} \right)$$

$$x = \frac{e}{e + d}$$

Los valores calculados para x, y fueron los siguientes:

$$x = 1.0 ; y = 0.2$$

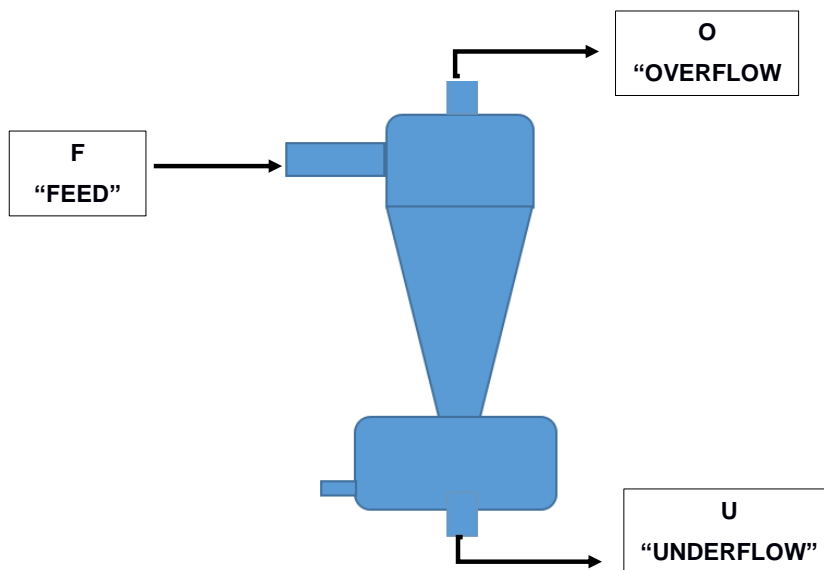
De acuerdo a la tabla anexada en el apéndice C, el valor de  $k_3 = 0.02$   
(Revisar apéndice C, donde se especifica el valor de  $k_3$ )

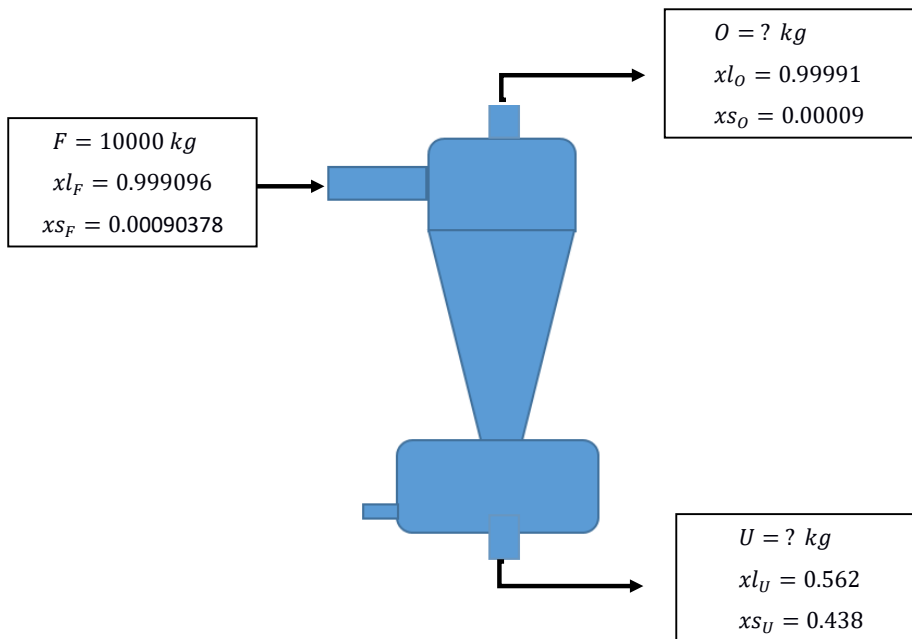
Aunque la pérdida de carga es casi nula se lo estima para calcular la superficie de mojado (superficie de la criba), para ello se utiliza la ecuación 2.7

$$A = \sqrt{\frac{1}{0.6 \left(2 \times 9.8 \frac{m}{s^2}\right)} \left(0.00278 \frac{m^3}{s}\right)^2 \frac{1}{0.000030625m}} = 0.1465m^2$$

### Dimensionamiento del hidrociclón

Para poder determinar las dimensiones del hidrociclón es importante definir el porcentaje estimado de retención. Como se espera que el hidrociclón retenga el 90% de los sólidos residuales, fijamos el balance de materia de acuerdo a dichas condiciones.





Se considera que la **base de cálculo es de 1 hora**, además las fracciones se encuentran estimadas de acuerdo a la cantidad de sólidos a la alimentación:

$$\rho_{Feed} = 1.112 \frac{g}{cm^3}$$

$$\text{Contenido de sólidos} = 1.005 \frac{g}{L}$$

$$10000 \text{ kg} * \frac{1L}{1.112 \text{ kg}} = 8992.80L$$

$$8992.80L * \frac{1.005g \text{ sólidos}}{1L} = 9037.77g$$

$$x_{s_F} = \frac{9.03777 \text{ kg}}{10000 \text{ kg}} = 0.00090378$$



$$x_{lF} = 1 - 0.0090378 = 0.999096$$

Balance general

$$F = O + U \quad (1)$$

Balance por especie - "sólidos"

$$x_{sF} * F = x_{sO} * O + x_{sU} * U \quad (2)$$

Uniendo las ecuaciones 1 y 2

$$10000 \text{ kg} = O + U$$

$$0.00090378 * 10000 \text{ kg} = 0.00009 * O + 0.438 * U$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones

$$O = 9981.86 \text{ kg}$$

$$U = 18.13402 \text{ kg}$$

De ahí, se pueden calcular las salidas tanto del "Overflow" como del "Underflow".

Para el "Overflow"

$$\text{Sólidos presentes} = 9981.863 \text{ kg} * 0.00009 = 0.90378 \text{ kg}$$

$$\text{Agua de salida de salida} = 9981.863 \text{ kg} * 0.99991 = 9980.96 \text{ kg}$$

Para el "Underflow"

$$\text{Sólidos presentes} = 18.13402 \text{ kg} * 0.438 = 8.13402 \text{ kg}$$

$$\text{Agua de salida de salida} = 18.13402 \text{ kg} * 0.562 = 10.43538 \text{ kg}$$

Las partículas de paso a la alimentación tienen un tamaño superior a  $100 \mu m$ , por ello para estimar el tamaño de las partículas para el 60% de paso utilizamos el gráfico de clasificación de ciclones. (Revisar gráfico 1 del anexo C).

La gravedad específica de los lodos se muestra a continuación

$$S.G \text{ lodos (Overflow)} = 1.507$$

$$S.G \text{ lodos (Underflow)} = 1.992$$

$$S.G \text{ lodos (Feed)} = 1.621$$

Con la gravedad específica podemos hallar el flujo de los lodos en Galones Americanos por minuto (USGPM)

En el "Overflow"

$$9.98178 \text{ MTPH} \frac{1000 \text{ kg}}{1 \text{ MTPH}} * \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} * \frac{1 \text{ L}}{1.507 \text{ kg}} = 1.83991 \frac{\text{L}}{\text{s}}$$

$$1.83991 \frac{\text{L}}{\text{s}} * \frac{1 \text{ Galón Americano}}{3.785 \text{ L}} * \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}} = 29 \text{ GPM}$$

En el "Underflow"

$$0.01857 \text{ MTPH} \frac{1000 \text{ kg}}{1 \text{ MPH}} * \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} * \frac{1 \text{ L}}{1.992 \text{ kg}} = 1.992 \frac{\text{L}}{\text{s}}$$

$$0.002589 \frac{\text{L}}{\text{s}} * \frac{1 \text{ Galón Americano}}{3.785 \text{ L}} * \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}} = 0.04104 \text{ GPM}$$

En el "Feed"

$$10.00 \text{ MTPH} \frac{1000 \text{ kg}}{1 \text{ MTPH}} * \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} * \frac{1 \text{ L}}{1.621 \text{ kg}} = 1.621 \frac{\text{L}}{\text{s}}$$

$$1.71362 \frac{\text{L}}{\text{s}} * \frac{1 \text{ Galón Americano}}{3.785 \text{ L}} * \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}} = 27 \text{ GPM}$$

Donde el punto de corte para la retención del 60% de partículas fue:

$$D_{50} \text{ O/F } 60\% \text{ por paso} = 2.08 * 43 \mu\text{m} = 89 \mu\text{m}$$

Una vez conseguido los flujos en unidades inglesas, podemos aproximar las constantes de corrección (Revisar ecuación 2.11):

$$C_1 = \left( \frac{(53 - 0.07231 (\%vol))}{(53)} \right)^{(-1.43)} = 1$$

De forma analítica  $C_1$  se aproxima a 1

$$C_2 = \frac{3.27}{1 \text{ kPa}} * 82.7 \text{ kPa}^{-0.28} = 0.9$$

Donde de forma analítica obtenemos que  $C_2 = 0.9$ .

$$C_3 = \left( \frac{(1.65)}{(1.25 - 1)} \right)^{0.5} = 2.57$$

De forma analítica obtenemos que  $C_3 = 2.57$

Las gráficas de aproximación para las constantes  $C_1$  y  $C_2$  se encuentran en el apéndice C. En el apartado dimensionamiento del "hidrociclón"

Para hallar el punto de corte base  $D50_c$  consideramos las constantes de corrección:

$$D50_c = \frac{89 \mu m}{(1 * 0.9 * 2.57)} = 36 \mu m$$

Con el punto de corte estimamos el diámetro del ciclón en pulgadas:

$$\text{Diámetro} = 0,393701 * \left(\frac{36}{2,84}\right)^{\left(\frac{1}{0,66}\right)} = 18.66 \text{ inch}$$

El valor contante en la ecuación “0.393701” es un factor que involucra la conversión de micras a centímetros junto con los factores de cálculo para la estimación del diámetro. Se lo utiliza por facilidad de cálculo.

Entonces el área de la boquilla es:

$$A = \pi * \frac{(18.66 \text{ inch})^2}{4} = 17.40 \text{ inch}^2$$

Y la longitud del vórtice se estima

$$L_v = 0.35 * 18.66 \text{ inch} = 6.53 \text{ inch}$$

Finalmente, para estimar el número de ciclones requeridos se considera dos parámetros:

1. El rendimiento real de un solo ciclón de acuerdo a las dimensiones especificadas
2. El diámetro del ciclón

Para obtener el rendimiento real utilizamos una la gráfica donde se evalúa el diámetro del ciclón y la caída de presión del fluido. Esta se puede visualizar en el Apéndice C, en el gráfico titulado “Rendimiento real del ciclón”.

El rendimiento real del hidrociclón es de 700GPM, en función del rendimiento real estimamos el diámetro del ápice (en pulgadas) valiéndonos de la gráfica “Estimación del ápice” anexada en el apéndice C.

El diámetro del ápice es de 4.25 inch.

### **Análisis financiero**

#### **Estimación de costos de una criba**

Como la criba fue construida con los recursos de la misma empresa, se estima el costo por materiales y horas de trabajo.

#### **Costos de Criba**

<b>Materiales</b>	<b>Unidades necesarias</b>	<b>Costo Unitario</b>	<b>Total</b>
Rejilla 1.8mm abertura, acero inoxidable	1	\$ 20.50	\$20.50
Bases metálicas para anclaje	4	\$30.45	\$121.80
Laminas metálicas de acero para zona de desfogue	5	\$10.20	\$51.00
Pernos, tornillos, tuercas.	Aproximado	\$10.10	\$10.10
Laminas metálicas para zona de recuperación	2	\$7.50	\$15.00
Canal metálico, acero inoxidable	2	\$10.45	\$20.90
Horas de trabajo compensadas	30 Pago final	\$68.00	\$68.00
<b>TOTAL</b>	-	-	<b>\$ 299.30</b>

#### **Estimación de costos de un hidrociclón**

De acuerdo a un estudio realizado por “MBA Polymers” hidrociclón para dicha capacidad tiene un valor aproximado de \$2000.00, sin embargo la cotización fue realizada en los Estados Unidos en 1998, es por ello que se debe transformar el valor a la localidad y al presente año. (APC, 1998)

$$Cost \$_{2019} Ecuador = Cost \$_{1998} Location A \left( \frac{Cost Index 2018}{Cost Index 1998} \right) \left( \frac{Location Ecuador}{Location USA} \right)$$

Los valores del índice de costos fueron tomados de (NTNU, 2012), la gráfica donde se registra el "Cost Index" se encuentra anexada en el apéndice C en el apartado "Análisis financiero".

Los valores del índice de localización fueron tomados de (Sinnott, 2007)

$$Cost \$_{2019} Ecuador = \$2000 \left( \frac{603.1}{389.5} \right) \left( \frac{1.14}{1.07} \right) = \$3299.38$$

#### **Costos de instalación de los equipos**

De acuerdo a la ecuación de Lang

$$Costo Instalación = (\$3299.38 + \$299.30) * 3.63 = \$13063.22$$

Los costos calculados representan la inversión requerida para el proyecto, en cambio el costo por operación del hidrociclón y la criba se aproxima a \$50.00 anuales.

#### **Estimación de ingresos**

Los ingresos fueron vistos como ahorro por agua de lavado, retro lavado y riego. El gasto por desperdicio de agua fue de \$504 mensual.

Considerando que el valor es constante, el ahorro asciende a \$6048.00 anual.

#### **Flujo de caja**

Considerando un valor de salvamento del 25% de la inversión y que la inflación permanece constante a través del tiempo.

$$TMAR = 1.12\% + 5\%0 = 6.12\%$$

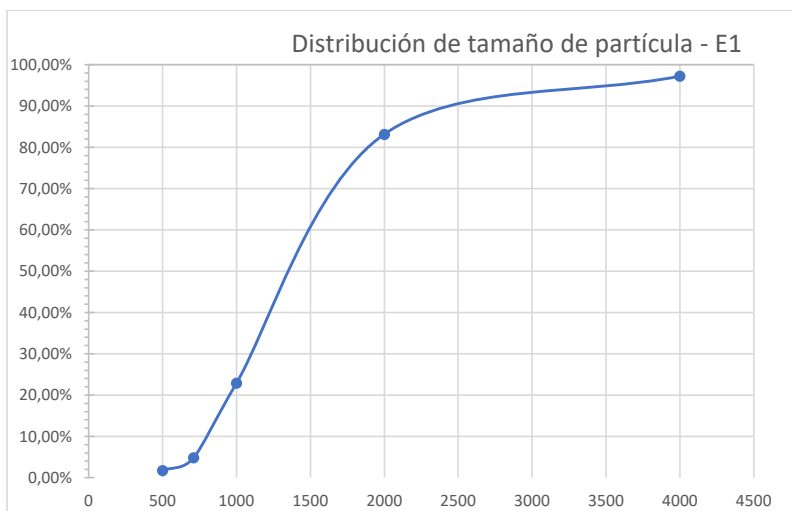
### Flujo de Caja

Inflación		1,0054	1,0054	1,0054	1,0054	1,0054	1,0054	1,0054
Años	0	1	2	3	4	5	6	7
Ingresos		6048	6080,6592	6113,49476	6146,50763	6179,69877	6213,06915	6246,61972
Costo fijo	0	50,27	50,541458	50,8143819	51,0887795	51,3646589	51,6420281	51,9208951
Depreciación	1336,252	1343,46776	1350,72249	1358,01639	1365,34968	1372,72256	1380,13527	1387,588
Utilidad antes de impuestos		4654,26224	4679,39526	4704,66399	4730,06918	4755,61155	4781,29185	4807,11083
Impuestos		1861,7049	1871,7581	1881,8656	1892,02767	1902,24462	1912,51674	1922,84433
Utilidad después de impuestos		2792,55734	2807,63715	2822,79839	2838,04151	2853,36693	2868,77511	2884,2665
Depreciación	1336,252	1343,46776	1350,72249	1358,01639	1365,34968	1372,72256	1380,13527	1387,588
Valor de salvamento	3340,63	3358,6694	3376,80622	3395,04097	3413,37419	3431,80641	3450,33817	3468,96999
FNE		7494,69451	7535,16586	7575,85575	7616,76537	7657,89591	7699,24854	7740,82449
Tmar mixta con inflación		0,256688	0,256688	0,256688	0,256688	0,256688	0,256688	0,256688
TOTAL	-13362,52	5963,84664	4771,3127	3817,23848	3053,94144	2443,27369	1954,71539	1563,84946
<b>VAN</b>	<b>10205,6578</b>							
<b>TIR</b>	<b>22%</b>							

Para los cálculos se considera que la empresa paga impuestos a una tasa de 40%.

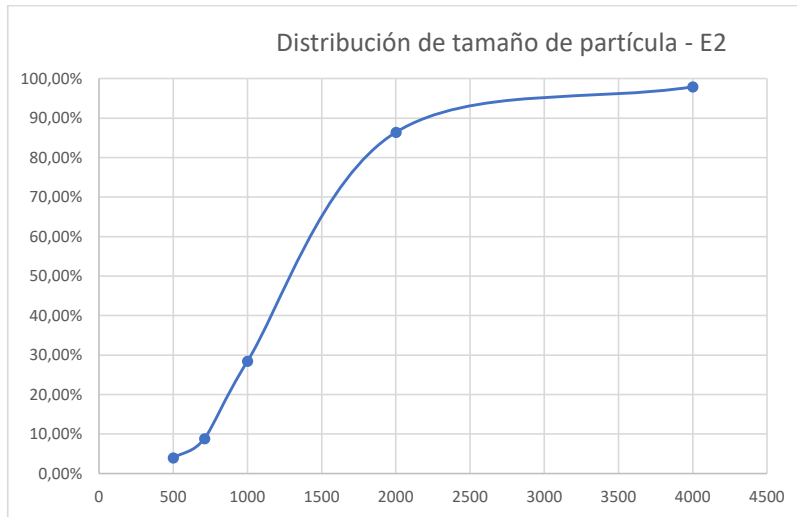
## APÉNDICE B - ENSAYOS DE GRANULOMETRÍA

Ensayo 1					
Denominación	Abertura [µm]	Masa retenida [g]	% Retenido	%Retenido acumulado	%Paso
Tamiz 5	4000	4.2	2.82%	2.82%	97.18%
Tamiz 10	2000	20.9	14.04%	16.86%	83.14%
Tamiz 18	1000	89.72	60.27%	77.13%	22.87%
Tamiz 25	710	26.9	18.07%	95.20%	4.80%
Tamiz 35	500	4.55	3.06%	98.25%	1.75%
Base	500<	2.6	1.75%	100.00%	
TOTAL		148.87			

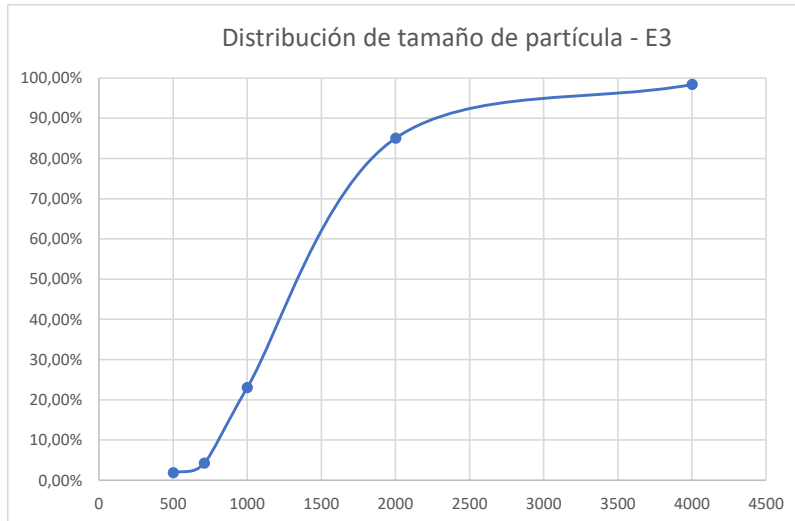


Ensayo 2					
Denominación	Abertura [µm]	Masa retenida [g]	% Retenido	%Retenido acumulado	%Paso
Tamiz 5	4000	3.52	2.08%	2.08%	97.92%
Tamiz 10	2000	19.51	11.50%	13.58%	86.42%
Tamiz 18	1000	98.33	57.97%	71.55%	28.45%
Tamiz 25	710	33.2	19.57%	91.13%	8.87%
Tamiz 35	500	8.28	4.88%	96.01%	3.99%
Base	500<	6.77	3.99%	100.00%	
TOTAL		169.61			

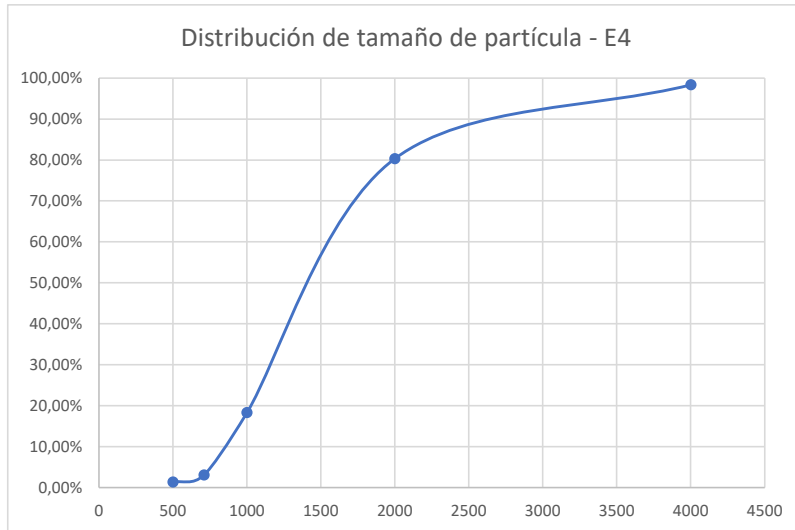




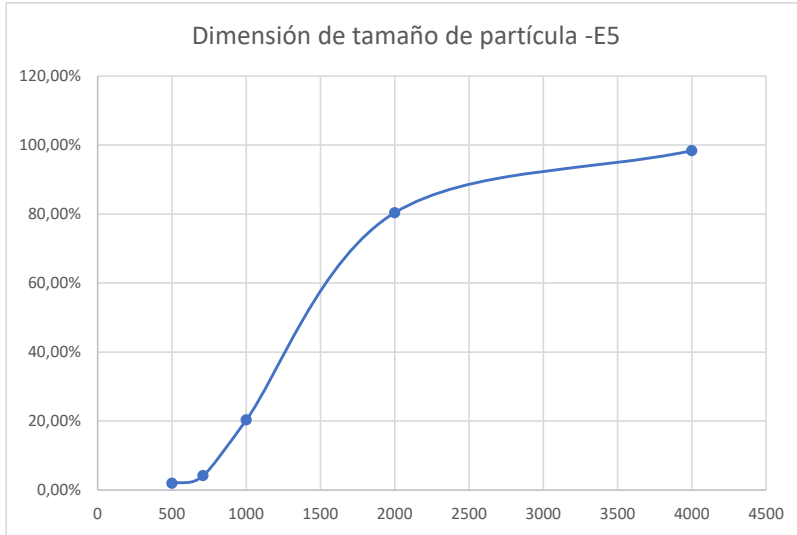
<b>Ensayo 3</b>					
Denominación	Abertura [µm]	Masa retenida [g]	% Retenido	%Retenido acumulado	%Paso
Tamiz 5	4000	2.84	1.65%	1.65%	98.35%
Tamiz 10	2000	22.93	13.33%	14.98%	85.02%
Tamiz 18	1000	106.6	61.98%	76.96%	23.04%
Tamiz 25	710	32.34	18.80%	95.76%	4.24%
Tamiz 35	500	4.08	2.37%	98.13%	1.87%
Base	500<	3.21	1.87%	100.00%	
TOTAL		172			



<b>Ensayo 4</b>					
Denominación	Abertura [µm]	Masa retenida [g]	% Retenido	%Retenido acumulado	%Paso
Tamiz 5	4000	3.01	1.66%	1.66%	98.34%
Tamiz 10	2000	32.58	18.02%	19.68%	80.32%
Tamiz 18	1000	112.2	62.04%	81.72%	18.28%
Tamiz 25	710	27.49	15.20%	96.93%	3.07%
Tamiz 35	500	3.16	1.75%	98.67%	1.33%
Base	500<	2.4	1.33%	100.00%	
<b>TOTAL</b>		<b>180.84</b>			



<b>Ensayo 5</b>					
Denominación	Abertura [µm]	Masa retenida [g]	% Retenido	%Retenido acumulado	%Paso
Tamiz 5	4000	2.96	1.67%	1.67%	98.33%
Tamiz 10	2000	31.84	17.95%	19.62%	80.38%
Tamiz 18	1000	106.5	60.05%	79.67%	20.33%
Tamiz 25	710	28.61	16.13%	95.80%	4.20%
Tamiz 35	500	3.95	2.23%	98.03%	1.97%
Base	500<	3.49	1.97%	100.00%	
<b>TOTAL</b>		<b>177.35</b>			



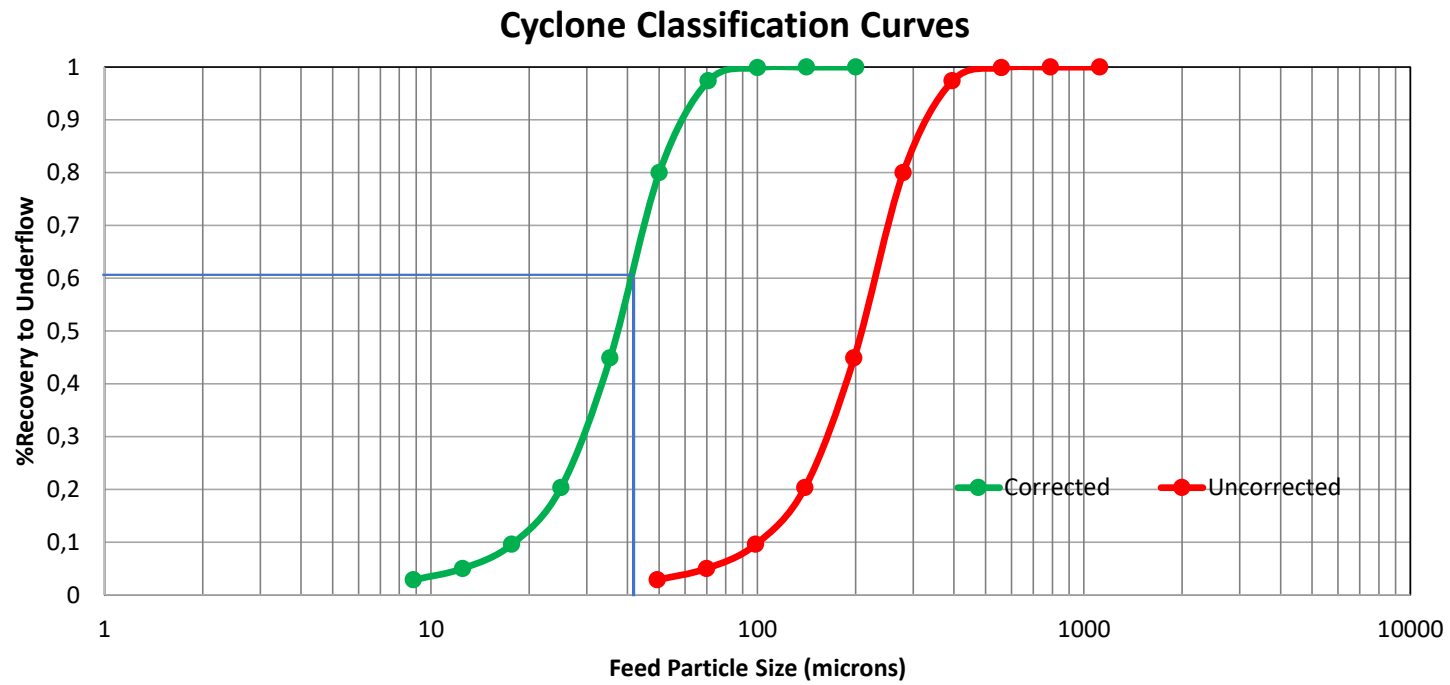
## APÉNDICE C - TABLAS Y GRÁFICOS PARA OBTENCIÓN DE DATOS

### Dimensionamiento de la criba

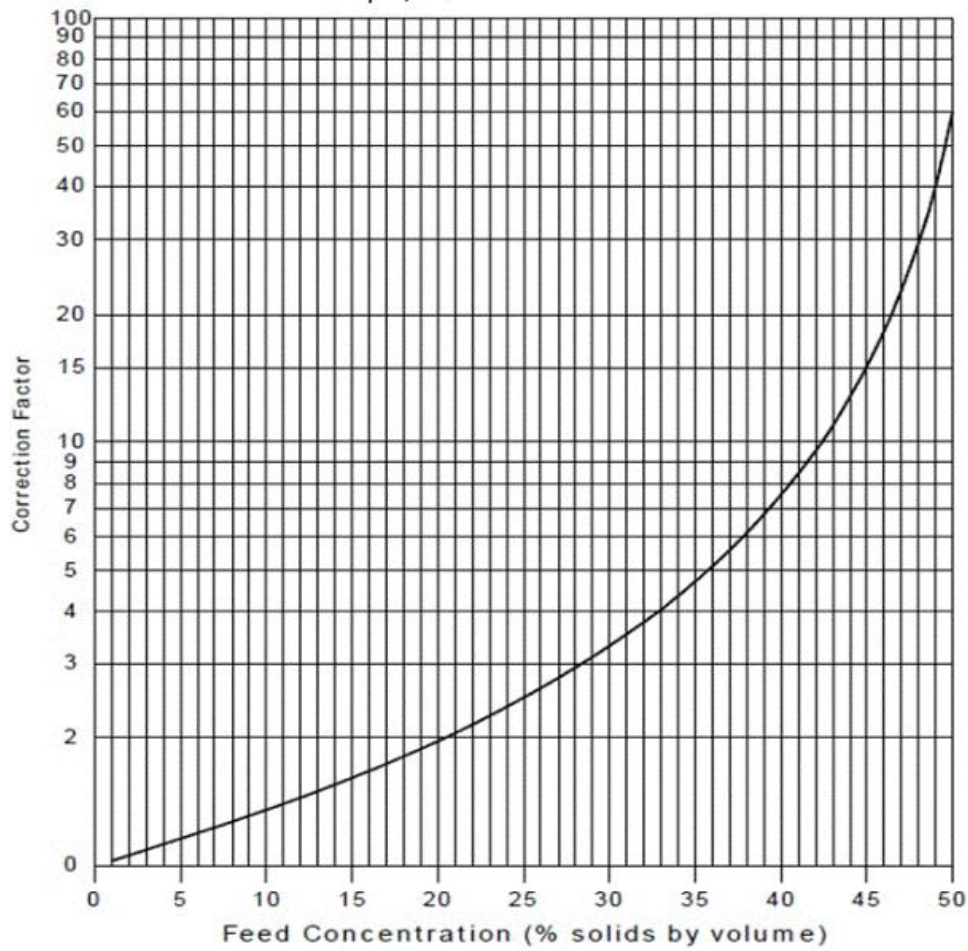
Tabla de valores de  $k_3$  (Gutiérrez, 2007)

	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
0	245	51,5	18,2	8,25	4	2	0,97	0,42	0,13	0,01
0,2	230	48	17,4	7,7	3,75	1,87	0,9	0,4	0,13	0,01
0,4	221	46	16,6	7,4	3,6	1,8	0,88	0,39	0,12	0,01
0,6	199	42	15	6,6	3,2	1,6	0,8	0,36	0,11	0,02
0,8	164	34	12,2	5,5	2,7	1,34	0,66	0,31	0,11	0,02
1	149	31	11,11	5	2,4	1,2	0,61	0,29	0,11	0,02
1,4	137	28,4	10,3	4,6	2,25	1,15	0,58	0,28	0,11	0,03
2	134	27,4	9,9	4,4	2,2	1,13	0,58	0,28	0,12	0,04
3	132	27,5	10	4,5	2,24	1,17	0,61	0,31	15	0,05

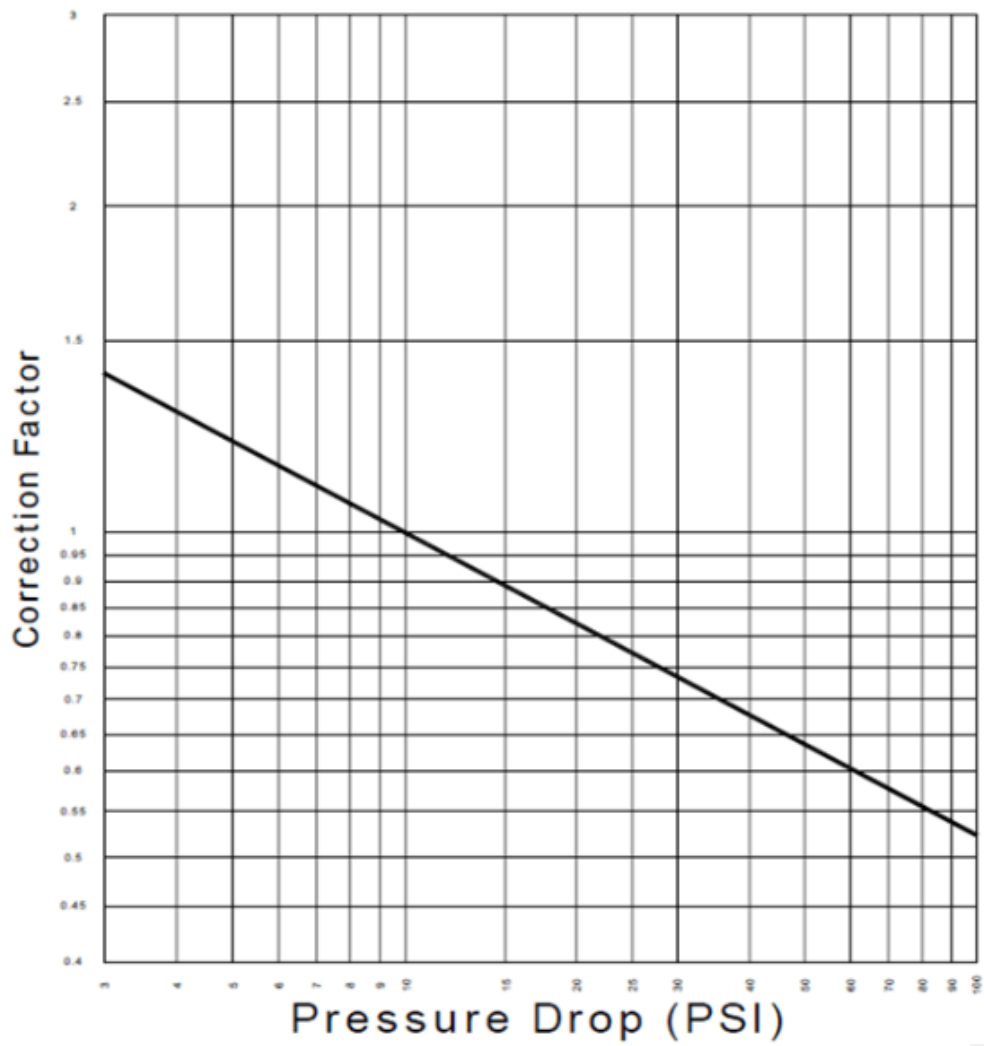
## Dimensionamiento del hidrociclón



Curvas de clasificación del ciclón (Michaud, 2017)

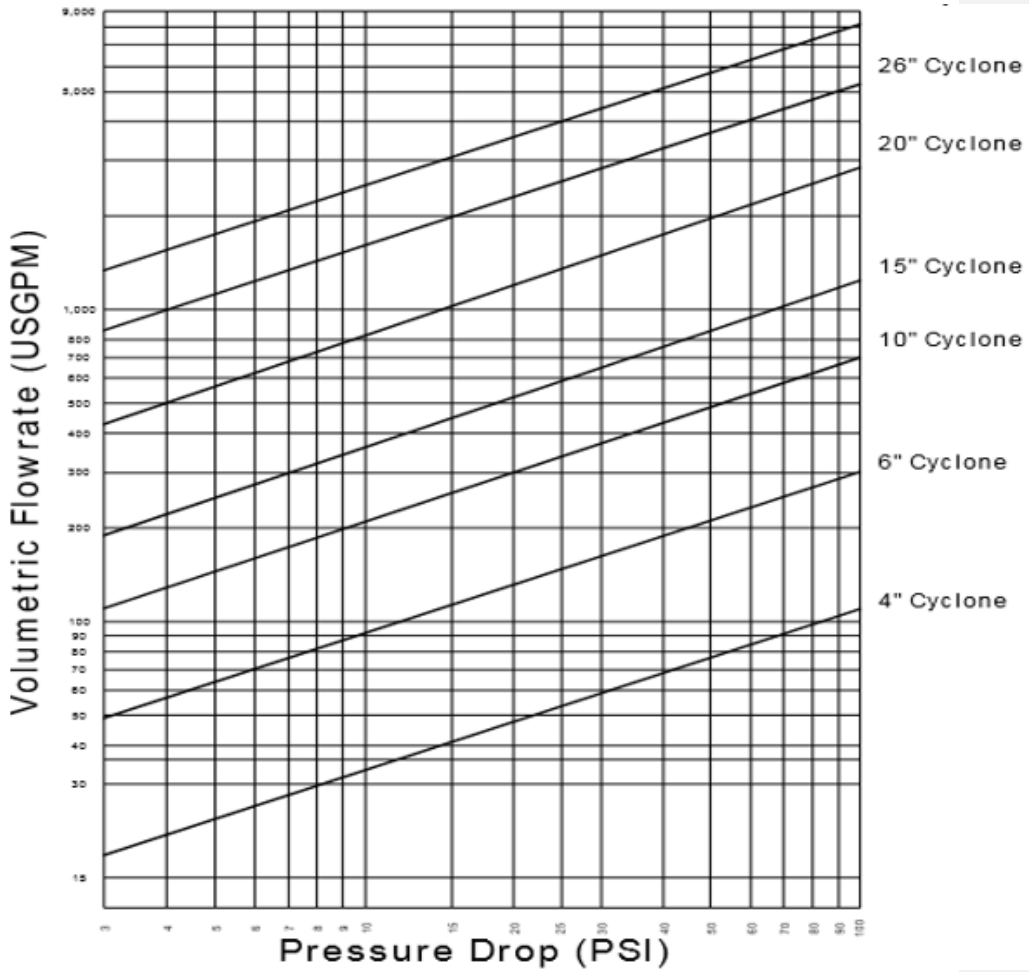


Factor de corrección C1 (Michaud, 2017)

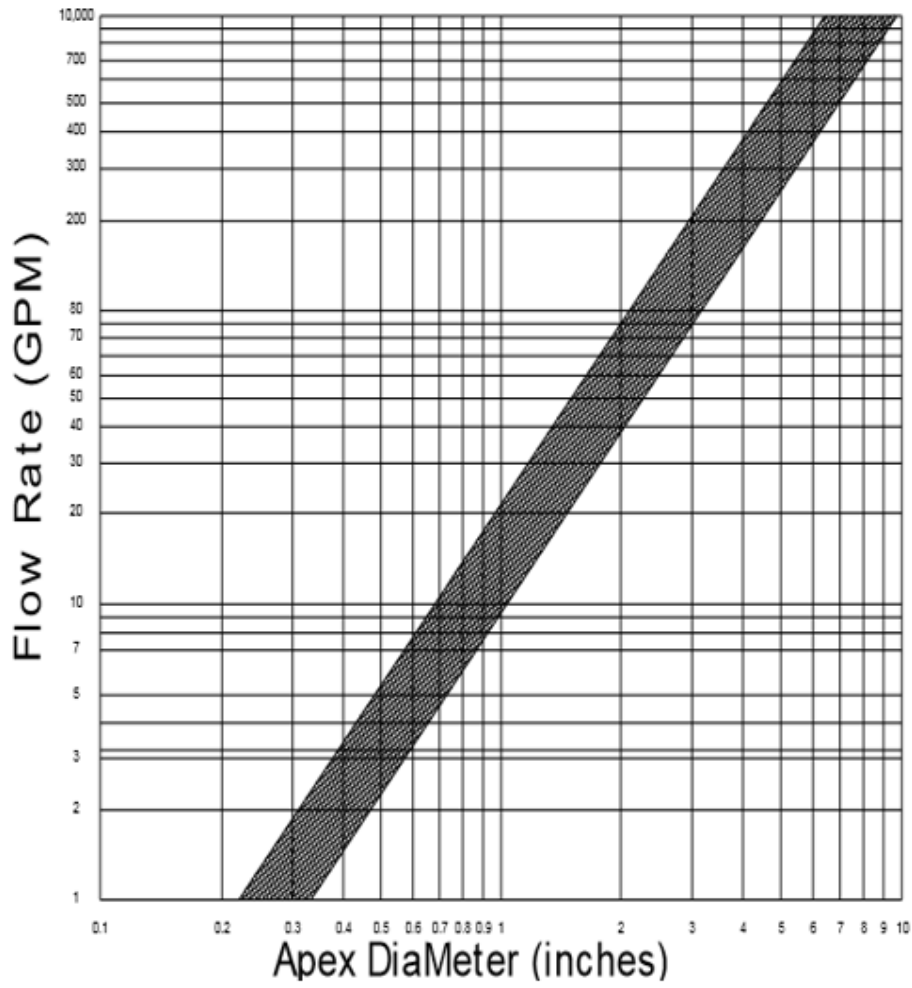


Factor de corrección C2 para caída de presión (Michaud, 2017)



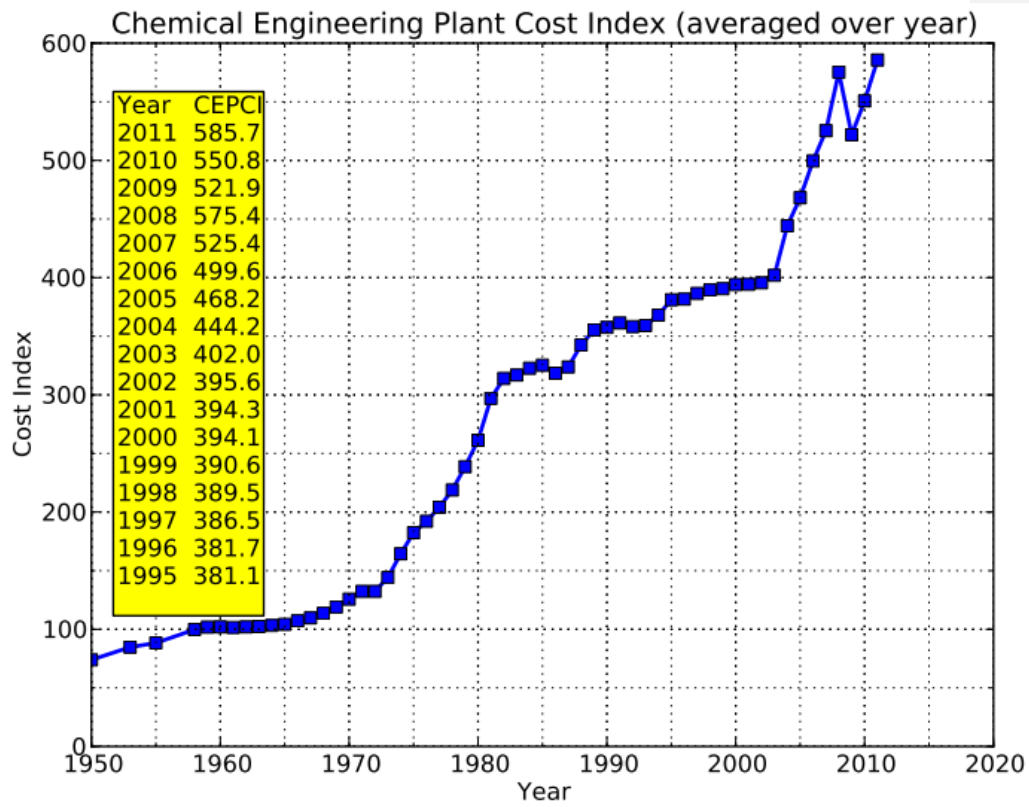


Rendimiento real del ciclón en USGPM (Michaud, 2017)



Estimación del diámetro del ápice (Michaud, 2017)

## Análisis Financiero



Índices de costo de plantas promediado por año (NTNU, 2012)

## APÉNDICE D – REGISTRO DE FOTOS



Evaluación de la PTAR antes del rediseño



Toma de muestras para ensayo de granulometría



Antigua criba obsoleta



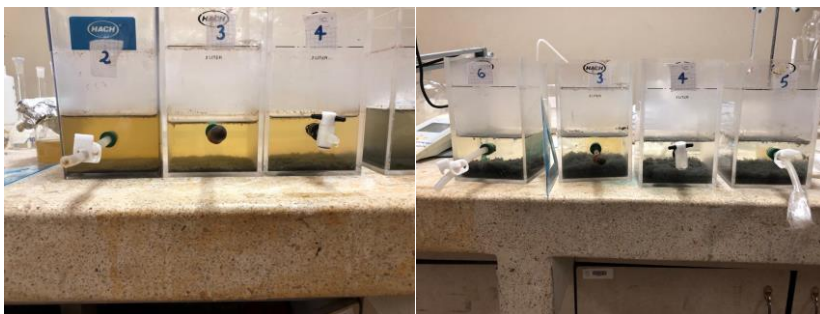
Fabricación de la criba



Montaje final de la nueva criba



Formación de flóculos



Ensayos de "Test de Jarras"

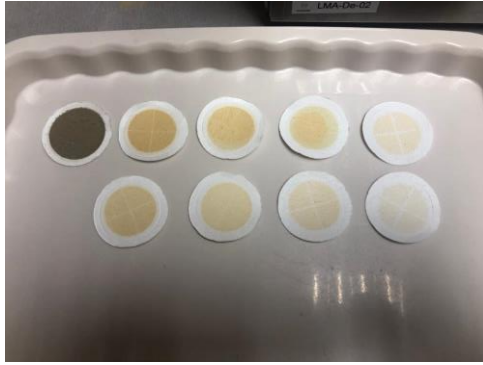


Muestras para los respectivos análisis de calidad de agua



Turbidímetro utilizado para los análisis





Filtros luego del ensayo de SST