

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE DE LA  
QUEBRADA CICUEDO PARA LA COMUNIDAD DEL RESGUARDO INDÍGENA  
EMBERA KATIO GITÓ DOKABÚ**

**FELIPE GUZMÁN CHAVES  
LUIS FELIPE DÍAZ DUQUE**

**Proyecto integral de grado para optar el título de  
INGENIERO QUÍMICO**

**Orientador**

**Oscar Libardo Lombana Charfuelan  
Ingeniero Químico**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS  
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BOGOTÁ D.C.  
2022**

## Nota de Aceptación

---

---

---

---

---

---

---

Ing. Diana Marcela Cuesta Parra

**Jurado 1**

---

Ing. Adriana Suesca Díaz

**Jurado 2**

Bogotá D.C., Febrero del 2022

## **DIRECTIVOS DE LA UNIVERSIDAD**

*Presidente de la Universidad y Rector del Claustro*

*Dr. MARIO POSADA GARCÍA-PEÑA*

*Consejo institucional*

*Dr. LUIS JAIME POSADA GARCÍA-PEÑA*

*Vicerrectora Académica y de Investigaciones*

*Dra. ALEXANDRA MEJÍA GUZMÁN*

*Vicerrector Administrativo y Financiero*

*Dr. RICARDO ALFONSO PEÑARANDA CASTRO*

*Secretario General*

*Dr. JOSÉ LUIS MACÍAS RODRÍGUEZ*

*Decano de la Facultad*

*Ing. NALINY PATRICIA GUERRA PRIETO*

*Director de Programa*

*Ing. NUBIA LILIANA BECERRA OSPINA*

Las directivas de la Fundación Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente son exentos de la responsabilidad de los criterios e ideas expuestos en el presente documento. La responsabilidad es exclusiva de los autores.

## DEDICATORIA

Dedicamos este trabajo de grado, primeramente, a Dios por permitirnos llegar hasta acá, sanos, siempre aprendiendo no solo intelectualmente, si no haciéndonos mejores en todos los aspectos, a nuestros padres que siempre nos han apoyado, no solo económicamente si no con instrucciones, sabiduría, con palabras de amor y apoyo que nos han traído hasta este momento.

A todos los amigos que nos han acompañado en este proceso, así como a toda la institución Universidad de América por sus enseñanzas todos estos años.

*Felipe Guzman Chaves*

*Luis Felipe Díaz Duque*

## **AGRADECIMIENTOS**

A nuestro director de tesis Ingeniero Oscar Lombana, por instruirnos y direccionarnos en este proyecto.

Al gerente de PITLDA, Javier Chaves Benavides que nos asesoró en el proceso de diseño y cotización de equipos, así como asentar el proyecto a una realidad colombiana.

Nuevamente a nuestros abuelos, padres, hermanos por su amor y apoyo.

## TABLA DE CONTENIDO

	pág.
1. INTRODUCCIÓN	16
2. OBJETIVOS	17
2.1. Objetivo general	17
2.2. Objetivos específicos	17
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.	18
4. ANTECEDENTES.	20
5. MARCO REFERENCIAL	23
5.1. Localización	23
5.2. Población	26
6. MARCO TEÓRICO	28
6.1. Operaciones unitarias	28
6.1.1. <i>Cribado</i>	28
6.1.2. <i>Sedimentación</i>	28
6.1.3. <i>Flotación</i>	33
6.1.4. <i>Filtración</i>	34
6.1.5. <i>Microfiltración</i>	39
6.1.6. <i>Ultrafiltración</i>	39
6.1.7. <i>Nanofiltración</i>	40
6.1.8. <i>Decantación</i>	40
6.1.9. <i>Transferencia de iones</i>	40
6.1.10. <i>Transferencia molecular</i>	56
6.2. Propiedades del agua.	58
6.1.1 <i>Aspectos fisicoquímicos</i>	58
6.1.2 <i>Aspectos microbiológicos</i>	60
6.3. Tipo de agua	61
6.3.1. <i>Agua superficial</i>	61
6.3.2. <i>Agua subterránea</i>	61
6.3.3. <i>Agua potable</i>	62
6.4. MARCO LEGAL	62

6.4.1.	<i>Constitución Política de Colombia</i>	62
6.4.2.	<i>Ley 99 de 1993</i>	62
6.4.3.	<i>Decreto 1575 del 2007</i>	62
6.4.4.	<i>Decreto 1594 de 1984</i>	62
6.4.5.	<i>Decreto 3930 de 2010</i>	64
6.4.6.	<i>Decreto 1541 de 1978</i>	64
6.4.7.	<i>Resolución 2115 del 2007</i>	64
6.4.8.	<i>Resolución N°1096 del 17 de noviembre de 2000 (RAS 2000)</i>	69
7.	DIAGNOSTICO	70
7.1.	Pretratamiento	70
7.2.	Análisis del agua cruda	70
7.3.	Diagrama de proceso	72
7.4.	Determinación del caudal	73
7.4.1.	<i>Cálculo de la población futura</i>	73
7.4.2.	<i>Dotación neta máxima</i>	75
7.4.3.	<i>Dotación bruta</i>	76
7.4.4.	<i>Caudal medio diario (<math>Q_{md}</math>)</i>	77
7.4.5.	<i>Caudal máximo diario (<math>Q_{MD}</math>)</i>	77
7.4.6.	<i>Caudal máximo horario (<math>Q_{MH}</math>)</i>	78
8.	MATRIZ DE SELECCIÓN DE PROCESOS	80
8.1.	Coagulación (mezcla rápida)	82
8.2.	Coagulante	85
8.3.	Floculación (mezcla lenta)	89
8.4.	Floculante	93
8.5.	Unidad de sedimentación	96
8.6.	Unidad de filtración	100
8.7.	Unidad de desinfección	104
8.8.	Tratamiento de lodos residuales	107
8.8.1.	<i>Espesamiento</i>	108
8.8.2.	<i>Estabilización</i>	111
8.8.3.	<i>Deshidratación</i>	115



8.8.4. <i>Disposición final</i>	118
9. DIMENSIONAMIENTO DE EQUIPOS	119
9.1. Vertedero triangular de 90°	120
9.2. Tanque de dosificación	130
9.3. Floculador hidráulico de flujo horizontal	134
9.4. Clarificador	144
9.4.1. <i>Zona de sedimentación</i>	146
9.4.2. <i>Zona de entrada</i>	155
9.4.3. <i>Zona de lodos</i>	158
9.4.4. <i>Zona de salida</i>	160
9.5. Unidad de filtración rápida	162
9.6. Unidad de desinfección	177
9.6.1. <i>Dosis de hipoclorito de sodio</i>	183
9.7. Unidad de tanque de almacenamiento de agua potable	185
10. ANALISIS DE COSTOS	187
10.1. Costos de equipos	187
10.2. Costos fijos	189
10.2.1. <i>Consumo de sulfato de aluminio</i>	189
10.2.2. <i>Consumo de hipoclorito de sodio</i>	190
10.2.3. <i>Agua de servicio</i>	190
10.2.4. <i>Mano de obra</i>	190
11. CONCLUSIONES	193
BIBLIOGRAFÍA	194
ANEXOS	199

## LISTA DE FIGURAS

	pág.
<b>Figura 1.</b> <i>Localización resguardo indígena Embera Katio Gitó Dokabú</i>	23
<b>Figura 2.</b> <i>Red hídrica de Pueblo Rico (Risaralda, Pereira)</i>	25
<b>Figura 3.</b> <i>Precipitación anual del municipio de Pueblo Rico (Risaralda, Pereira)</i>	26
<b>Figura 4.</b> <i>Datos demográficos comunidad Embera Katio Gitó Dokabú</i>	27
<b>Figura 5.</b> <i>Diagrama paragenético de los tipos de sedimentación</i>	31
<b>Figura 6.</b> <i>Tipos de sedimentación para diferentes tipos de unidades</i>	32
<b>Figura 7.</b> <i>Proceso de flotación</i>	34
<b>Figura 8.</b> <i>Proceso de filtración</i>	35
<b>Figura 9.</b> <i>Mezclador rápido mecánico de una cámara</i>	43
<b>Figura 10.</b> <i>Resalto hidráulico en un vertedero</i>	46
<b>Figura 11.</b> <i>Proceso de coagulación-floculación</i>	48
<b>Figura 12.</b> <i>Esquema del proceso de potabilización</i>	73
<b>Figura 13.</b> <i>Caudales unitarios respecto a caudales de diseño</i>	122
<b>Figura 14.</b> <i>Dosis óptima de aluminio a distintos valores de pH</i>	131
<b>Figura 15.</b> <i>Esquema clarificador lamelar</i>	145
<b>Figura 16.</b> <i>Curva de cloro residual libre vs Dosificación de cloro</i>	184
<b>Figura 17.</b> <i>Vista isométrica vertedero triangular de 90°</i>	203
<b>Figura 18.</b> <i>Vista frontal vertedero triangular de 90°</i>	204
<b>Figura 19.</b> <i>Vista lateral del vertedero triangular de 90°</i>	205
<b>Figura 20.</b> <i>Vista isométrica floculador horizontal</i>	206
<b>Figura 21.</b> <i>Vista superior floculador horizontal</i>	207
<b>Figura 22.</b> <i>Vista lateral de la zona 1 del floculador horizontal</i>	208
<b>Figura 23.</b> <i>Vista lateral de la zona 2 del floculador horizontal</i>	209
<b>Figura 24.</b> <i>Vista isométrica clarificador lamelar</i>	210
<b>Figura 25.</b> <i>Vista frontal clarificador lamelar</i>	211
<b>Figura 26.</b> <i>Vista isométrica del filtro rápido de arena</i>	213
<b>Figura 27.</b> <i>Vista lateral del filtro rápido de arena</i>	214
<b>Figura 28.</b> <i>Vista frontal del filtro rápido de arena</i>	215
<b>Figura 29.</b> <i>Vista isométrica del tanque de desinfección</i>	216

<b>Figura 30.</b> <i>Vista superior del tanque de desinfección</i>	217
<b>Figura 31.</b> <i>Vista isométrica del tanque de almacenamiento</i>	218
<b>Figura 32.</b> <i>Vista lateral del tanque de almacenamiento</i>	219

## LISTA DE TABLAS

	pág.
<b>Tabla 1.</b> <i>Tipos de sedimentación</i>	29
<b>Tabla 2.</b> <i>Gradiente de diseño del mezclador rápido</i>	42
<b>Tabla 3.</b> <i>Criterios de diseño del mezclador rápido</i>	42
<b>Tabla 4.</b> <i>Parámetros de diseño de mezcladores rápidos hidráulicos</i>	45
<b>Tabla 5.</b> <i>Agente coagulante de acuerdo con la alcalinidad del agua a tratar</i>	46
<b>Tabla 6.</b> <i>Criterios generales de diseño de floculadores</i>	50
<b>Tabla 7.</b> <i>Tiempos de contacto de absorción o desgasificación</i>	51
<b>Tabla 8.</b> <i>Parámetros de diseño de bandejas de aireación</i>	52
<b>Tabla 9.</b> <i>Parámetros de diseño del material de las bandejas</i>	53
<b>Tabla 10.</b> <i>Parámetros de diseño para aireadores en cascadas y vertederos</i>	54
<b>Tabla 11.</b> <i>Efectividad de los desinfectantes</i>	55
<b>Tabla 12.</b> <i>Capacidad de destrucción de E. coli</i>	57
<b>Tabla 13.</b> <i>Criterios De Calidad Admisibles</i>	63
<b>Tabla 14.</b> <i>Características Físicas</i>	65
<b>Tabla 15.</b> <i>Características Químicas que tienen implicaciones sobre salud humana</i>	66
<b>Tabla 16.</b> <i>Características Químicas que tienen mayores consecuencias económicas e indirectas sobre la salud humana</i>	67
<b>Tabla 17.</b> <i>Análisis de la muestra de agua</i>	70
<b>Tabla 18.</b> <i>Proyección de la población</i>	74
<b>Tabla 19.</b> <i>Dotación neta por habitante y por día según número de habitantes servidos</i>	76
<b>Tabla 20.</b> <i>Caudales de diseño ajustados</i>	79
<b>Tabla 21.</b> <i>Criterios y porcentajes de importancia sistemas de tratamiento</i>	81
<b>Tabla 22.</b> <i>Descripción de criterios para el sistema de potabilización</i>	81
<b>Tabla 23.</b> <i>Calificación de niveles de desempeño</i>	82
<b>Tabla 24.</b> <i>Matriz de selección unidad de coagulación.</i>	83
<b>Tabla 25.</b> <i>Matriz de selección unidad de coagulación. (Continuación)</i>	84
<b>Tabla 26.</b> <i>Justificación del vertedero triangular.</i>	84
<b>Tabla 27.</b> <i>Descripción criterios de selección del coagulante</i>	85

<b>Tabla 28.</b> <i>Porcentajes de importancia para la selección del coagulante</i>	87
<b>Tabla 29.</b> <i>Matriz de selección del coagulante</i>	88
<b>Tabla 30.</b> <i>Justificación del sulfato de aluminio como coagulante</i>	88
<b>Tabla 31.</b> <i>Descripción de los criterios para la floculación</i>	89
<b>Tabla 32.</b> <i>Porcentajes de importancia de cada criterio</i>	91
<b>Tabla 33.</b> <i>Matriz de selección de la unidad de floculación</i>	91
<b>Tabla 34.</b> <i>Justificación del floculador de flujo horizontal</i>	92
<b>Tabla 35.</b> <i>Descripción criterios Floculantes</i>	93
<b>Tabla 36.</b> <i>Porcentajes de importancia</i>	94
<b>Tabla 37.</b> <i>Matriz de selección del floculante</i>	95
<b>Tabla 38.</b> <i>Justificación del floculante de poliacrilamidas aniónicas (L-1569A)</i>	95
<b>Tabla 39.</b> <i>Criterios diseño clarificador</i>	97
<b>Tabla 40.</b> <i>Descripción de criterios de selección para la unidad de sedimentación</i>	97
<b>Tabla 41.</b> <i>Matriz de selección unidad de sedimentación</i>	98
<b>Tabla 42.</b> <i>Justificación elección de unidad de clarificación lamelar</i>	99
<b>Tabla 43.</b> <i>Porcentaje de importancia de los criterios de la unidad de filtración</i>	100
<b>Tabla 44.</b> <i>Descripción de criterios de selección de la unidad de filtración</i>	101
<b>Tabla 45.</b> <i>Matriz de selección de la unidad de filtración</i>	102
<b>Tabla 46.</b> <i>Justificación de la unidad de filtración rápida</i>	102
<b>Tabla 47.</b> <i>Porcentaje de importancia de los criterios del desinfectante</i>	104
<b>Tabla 48.</b> <i>Descripción de criterios de selección del desinfectante</i>	105
<b>Tabla 49.</b> <i>Matriz de selección del desinfectante</i>	106
<b>Tabla 50.</b> <i>Justificación del hipoclorito de sodio como desinfectante</i>	106
<b>Tabla 51.</b> <i>Porcentaje de importancia para cada criterio</i>	108
<b>Tabla 52.</b> <i>Descripción de criterios de selección</i>	109
<b>Tabla 53.</b> <i>Matriz de selección de alternativa para espesamiento</i>	109
<b>Tabla 54.</b> <i>Justificación unidad de espesamiento por gravedad</i>	110
<b>Tabla 55.</b> <i>Porcentajes de importancia de los criterios seleccionados</i>	112
<b>Tabla 56.</b> <i>Descripción de criterios para la selección de la alternativa del proceso de estabilización</i>	112
<b>Tabla 57.</b> <i>Matriz de selección para el proceso de estabilización de lodos residuales</i>	113

<b>Tabla 58.</b> <i>Justificación estabilización anaeróbica</i>	114
<b>Tabla 59.</b> <i>Porcentajes de importancia para la deshidratación de lodos</i>	115
<b>Tabla 60.</b> <i>Descripción de criterios para la deshidratación de lodos</i>	115
<b>Tabla 61.</b> <i>Matriz de selección para la deshidratación de lodos</i>	117
<b>Tabla 62.</b> <i>Justificación de la unidad de deshidratación por secado natural</i>	117
<b>Tabla 63.</b> <i>Propiedades físicas del agua a diferentes temperaturas</i>	119
<b>Tabla 64.</b> <i>Valores de características de la mezcla rápida obtenidas por el método de Lozano-Rivas</i>	121
<b>Tabla 65.</b> <i>Coeficiente Cd para diversos ángulos de vertederos</i>	123
<b>Tabla 66.</b> <i>Gradientes de mezcla con respecto a diámetro de tubería y velocidad</i>	156
<b>Tabla 67.</b> <i>Características del lecho filtrante</i>	167
<b>Tabla 68.</b> <i>Costos estimados de equipos</i>	187
<b>Tabla 69.</b> <i>Costos fijos anuales de operación del sistema</i>	192

## RESUMEN

El resguardo indígena Embera Katio Gitó Dokabú se encuentra ubicado en el municipio de Pueblo Rico, que hace parte del departamento de Risaralda en Colombia. Actualmente es una de las comunidades más vulnerables al interior del territorio nacional. Su grado de vulnerabilidad es tan alto que no tienen acceso al agua potable, razón por la cual en el presente proyecto investigativo se hace un desarrollo teórico de un sistema de tratamiento de agua potable (STAP) que dé solución a la necesidad hídrica del resguardo.

Con el fin de llevar a cabo el STAP, en primer lugar, se hace un análisis fisicoquímico de la principal fuente hídrica que sirve de abastecimiento para la comunidad. Tomando como punto de partida este análisis fisicoquímico, en un segundo momento, se determinan los procesos y unidades que permitirán obtener una calidad de agua potable y segura para el consumo humano. Para determinar estos procesos y unidades se desarrollan matrices de selección, las cuales permiten hallar de forma cuantitativa la mejor alternativa para cada unidad de proceso.

Una vez desarrolladas las matrices de selección, se empieza con los dimensionamientos y cálculos de servicios necesarios para el funcionamiento de cada unidad de tratamiento, para lo cual, tras esclarecer el diseño y dimensiones de los equipos, se continua con la evaluación de costos de equipos y servicios.

**Palabras clave:** Agua, sistema de tratamiento, selección, diseño, equipos, servicios, costos

## 1. INTRODUCCIÓN

Teniendo en cuenta la necesidad de una calidad de agua limpia y segura para la comunidad Embera, se cuantifican algunas características fisicoquímicas, con las cuales se establece el Índice de Riesgo por Consumo de Agua (IRCA) al cual se enfrenta la comunidad actualmente de acuerdo a la normatividad.

Con el objetivo de desarrollar un sistema que pueda satisfacer la demanda hídrica de la comunidad indígena Embera Katio Gitó Dokabú, se plantea un diagrama de flujo de procesos en el cual se establecen los procedimientos del sistema, con los cuales se logre llevar el agua hasta los parámetros establecidos en el RAS 2000 y en la resolución 2115 de 2007. [1], [2]

Una vez claros estos procedimientos desarrolla una matriz de selección para escoger la mejor alternativa de equipos para cada proceso, y así dimensionar cada uno de ellos con base en la literatura.

Para finalmente evaluar los costos de los equipos, servicios, materia prima y mano de obra para el correcto funcionamiento del sistema.



## 2. OBJETIVOS

### 2.1. Objetivo general

Diseñar un sistema de tratamiento de agua potable para la comunidad del resguardo indígena Embera Katio Gitó Dokabú.

### 2.2. Objetivos específicos

- Caracterizar los parámetros fisicoquímicos de la calidad del agua respecto a la norma 2115-22 de 2007.
- Definir un método para el sistema de tratamiento de agua mediante una matriz de selección de procesos.
- Realizar el diseño conceptual de los equipos necesarios para el sistema de tratamiento.
- Evaluar los costos de operación y de equipos para el sistema de tratamiento de agua establecido.

### 3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Se ha pronosticado que “para el 2025, 1800 millones personas vivirán en regiones con escasez “absoluta” de agua (<500 m<sup>3</sup> al año per cápita)”. [3] Esto evidencia que, una parte importante de la población mundial dejará de disponer de un elemento de vital importancia como lo es el agua, la cual es un recurso indispensable para el desarrollo humano y social, pues es fuente y sustento de vida para el desarrollo de diversas actividades que son realizadas por las comunidades, actividades que van desde el consumo humano hasta la higiene.

Actualmente en el municipio de Pueblo Rico, ubicado en el departamento de Risaralda (Colombia), tiene una población de 14.429 personas de las cuales un 65% no tiene acceso al agua potable. [4] Dentro de esta población se encuentra la comunidad del resguardo indígena Embera Katio Gitó Dokabú, de la cual hacen parte 1484 indígenas que se encuentran en situación de vulnerabilidad a causa de esta situación y de otros diversos factores que han llevado a la comunidad a convertirse en una zona de riesgo por la falta de condiciones para la satisfacción de sus necesidades básicas, incluyendo el suministro de agua.

La comunidad actualmente cuenta con diferentes cuerpos acuíferos, sin embargo, es difícil determinar si estos cumplen con las medidas exigidas en la Resolución 2115 - 2007 para el suministro de agua potable, condiciones que de no ser cumplidas pueden generar problemas a corto y largo plazo dentro del resguardo. Con el fin de mejorar la calidad de vida de estas comunidades que, como se ha mencionado anteriormente no tiene a este recurso, y así mismo, satisfacer las necesidades básicas de su población, se requieren de nuevas alternativas y soluciones, dentro de las que se encuentran el proceso que se presenta en este proyecto, el cual permitirá, de forma viable, purificar el agua cruda para convertirla en agua potable para comunidad.

Con este proceso se pretende hacer un primer acercamiento conceptual de un sistema de tratamiento de agua potable (STAP) con el fin de disminuir las situaciones de riesgo

y mejorar la calidad de vida de la comunidad, reduciendo los problemas de salud asociados a la carencia de este recurso. Sin el presente proyecto, se complicaría el entender la situación de los cuerpos de agua de la zona y los procesos necesarios para que estos cumplan con la normatividad, lo cual podría generar un sin número de problemas en la comunidad.

De acuerdo a lo anterior, la presente investigación busca dar respuesta a la pregunta ¿Cómo asegurar la calidad del agua potable de la comunidad Embera Katio Gitó Dokabú mediante los criterios establecidos por la normatividad? para lo cual se apoya en los siguientes cuestionamientos secundarios ¿Cumplen las características del agua que consume la comunidad con lo establecido en la resolución 2115-22 de 2007?, ¿Cuáles son los mejores métodos para el tratamiento de agua potable en zonas rurales?, ¿Qué capacidad deben tener los diferentes equipos para tratar el agua de la zona? y ¿Cuánto cuestan los equipos y su operación para el sistema de agua potable que necesita la zona?.

#### 4. ANTECEDENTES

El desarrollo del presente análisis aborda el tema del diseño de un sistema de tratamiento de agua potable, suministrando bases teóricas suficientes para entender la metodología y caracterización del diseño que se debe tener en cuenta. Pero, al ser el tema del agua potable de tanta importancia para las sociedades, existen diversos estudios previos realizados en cuanto a las plantas de tratamiento de agua potable en otras comunidades y territorios.

El primero de ellos es el “Diseño de una planta de tratamiento de agua potable para la población de la Playita, sitio nuevo Magdalena”, el cual establece el diseño de una planta de tratamiento de agua potable ubicada en el departamento de Magdalena, con el fin de suministrar el recurso una población con limitación del mismo. En el mencionado proyecto investigativo se establecen varios métodos de tratamiento de aguas para regular la calidad del agua, estos de acuerdo a determinados factores normativos, los cuales son los mismos que dentro de la presente investigación se deben tener en cuenta. De forma tal que, este proyecto sirve de mecanismo para entender y aclarar los diferentes parámetros a tener en cuenta, y adicionalmente, suministra elementos relacionados al desarrollo y diseño de un sistema de tratamiento de agua potable.

Otro estudio previo realizado al respecto es “Propuesta de mejoramiento de la línea de insumos del proceso de tratamiento de agua potable en la planta regional de la empresa de acueducto, alcantarillado y aseo de Zipaquirá”. Este plantea para una empresa de acueducto y alcantarillado local, un proyecto de mejoramiento mediante diferentes métodos de tratamiento de agua potable. Dicha propuesta se enfoca en el desarrollo experimental de determinados métodos para realizar el proceso, lo cual permite conocer las características que debe tener el agua potable para su consumo, las etapas del proceso de potabilización y el método de selección de las posibles alternativas que se pueden presentar en un diseño de un sistema de tratamiento de agua potable.

El tercero es “Propuesta de mejora para el sistema de tratamiento de agua potable del acueducto Veredal Coovesur Ltda. E.S.P. del municipio de Fusagasugá-Cundinamarca” Estudio en que se explican varios métodos de mejora hacia un sistema de tratamiento de agua potable. Este permite conocer los diferentes métodos de perfeccionamiento en el proceso purificación del agua, los cuales se pueden aplicar en otros sistemas de tratamiento implementado. Además, permite identificar los diferentes parámetros que se usan para analizar la calidad del agua, así como la normatividad que establece los mismos.

Por su parte, el estudio “Tecnologías sostenibles para la potabilización y el tratamiento de aguas residuales” explica las diferentes tecnologías que se están implementado actualmente y el uso de ellas en la captación, tratamiento y reutilización del agua, como lo son las tecnologías sostenibles en zonas urbanas e industriales. De este proyecto se pueden extraer múltiples aspectos relevantes para el diseño del sistema de tratamiento que se requieren analizar para el proceso de la purificación del agua.

En el artículo “Tratamiento de agua para consumo humano” se hace un análisis profundo de los procesos de tratamiento del agua para el abastecimiento y consumo humano. Así mismo, se resaltan los aspectos de la importancia de la purificación del agua y se proponen diferentes métodos que se pueden utilizar para mejorar la calidad del agua, ya sea para uso doméstico, industrial o para el consumo humano. Adicionalmente, se abordan los diferentes enfoques fisicoquímicos y microbiológicos que se utilizan para el tratamiento del agua.

Otro antecedente es “Análisis de los diseños de las plantas de tratamiento de agua potable (PTAP) y calidad del agua cruda y tratada en el departamento de Cundinamarca”, el cual examina las diversas plantas de tratamiento de agua potable y residual de los municipios de Cundinamarca, de forma que, permite el acercamiento a diversos equipos para el tratamiento de aguas y las exigencias que hace al respecto a la norma colombiana.

En cuanto al estudio “Manual para el diseño de sistemas de agua potable y alcantarillado sanitario” este ofrece una propuesta de desarrollo metodológico, así como una serie de recomendaciones para el diseño de sistemas de agua potable y el proceso que se lleva a cabo. De igual forma, pone en práctica lo anteriormente mencionado de acuerdo a especificaciones y requerimientos determinados de diferentes casos, lo cual se convierte en una herramienta fundamental para la presente investigación.

El análisis realizado en “Diseño hidráulico de una planta de potabilización de agua en la vereda de san Antonio de Anapoima” permite tener un precedente implementado en una zona rural específica, puesto que la mayoría de los referentes han sido puestos en práctica en zonas urbanas. Esto añade nuevos diversos elementos y factores que antes no habían sido tomados en cuenta, como lo es las necesidades generadas por la reducción del tamaño de la población.

Finalmente, el estudio “Diseño del sistema de abastecimiento de agua potable para la aldea Captzín Chiquito, municipio de San Mateo Ixtatán, Huehuetenango” propone un desarrollo metodológico distinto, que tiene en cuenta los retos o desafíos que se tiene al implementar un proyecto de este estilo en comunidades vulnerables, como es el caso de una etnia indígena. De forma tal que, plantea un escenario similar al que se tiene en la presente investigación, lo cual permite abordar nuevas variables y elementos de cuidado que deben ser tenidos en cuenta en el desarrollo del presente proyecto.

## 5. MARCO REFERENCIAL

### 5.1. Localización

El resguardo Embera Katio Gitó Dokabú se encuentra ubicado en el municipio de Pueblo rico, en el departamento de Risaralda, en la región andina de Colombia; en las cercanías con el departamento del Chocó.

**Figura 1.**

*Localización resguardo indígena Embera Katio Gitó Dokabú*



**Nota.** La figura presenta la localización del resguardo en Colombia. Tomado de: Revista Semana (2019), “Volver a ser Embera después del conflicto armado”, [En línea]. <http://especiales.semana.com/volver-a-ser-embera-despues-del-conflicto-armado-en-colombia/index.html> [Acceso: Septiembre 22, 2021].

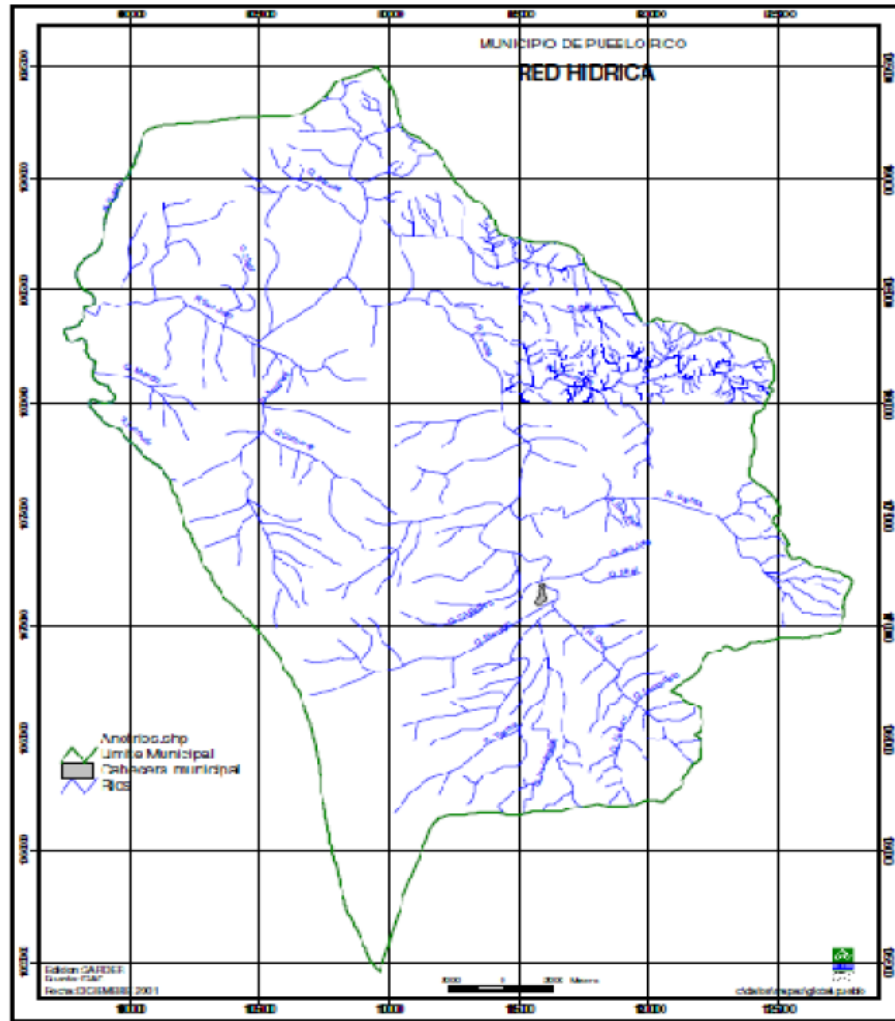
Este posee una altura de 450 metros sobre el nivel del mar (MSNM), de acuerdo con la información suministrada por Google Earth. El Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales- IDEAM ha identificado que en la región se tiene una temperatura promedio entre 24°C - 28°C, con una humedad relativa entre el 85 - 90%.

Tras identificar y ubicar geográficamente la zona de estudio, se realiza en el municipio de Pueblo Rico la búsqueda de las fuentes hídricas más cercanas, con el fin de identificar cuáles son las principales fuentes que posee actualmente la comunidad, logrando determinar que la Quebrada Cicuedo es la más importante entre ellas, lo cual se observa en la figura 2 que representa todas las fuentes hídricas en el municipio.



**Figura 2.**

*Red hídrica de Pueblo Rico (Risaralda, Pereira)*



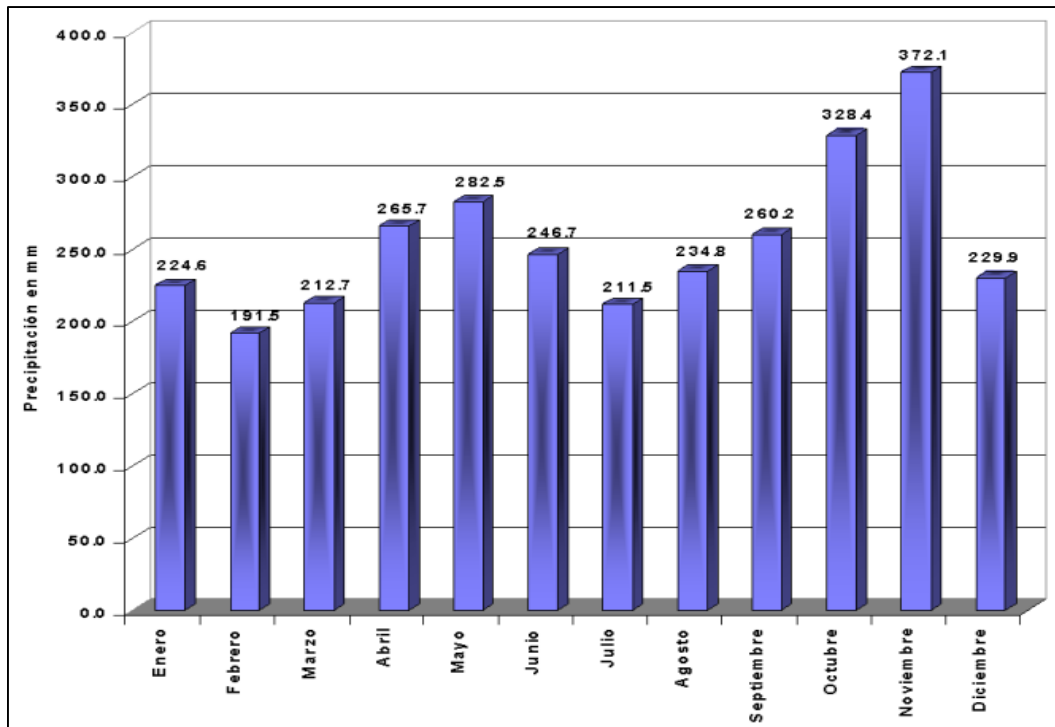
**Nota.** La figura representa la red hídrica del municipio de Pueblo Rico. Tomado de: Corporación Autónoma Regional de Risaralda. “Diagnóstico de riesgos ambientales municipio de Pueblo Rico Risaralda”. [En línea]. Disponible en: [https://nanopdf.com/download/pueblo-rico-risaralda-5b280ac2743da\\_pdf](https://nanopdf.com/download/pueblo-rico-risaralda-5b280ac2743da_pdf) [Acceso: Oct. 12, 2021]

Adicionalmente, se deben tener en cuenta otras fuentes de agua para la comunidad, como es el caso del agua de lluvia. Para analizar esta fuente, es necesario determinar

las precipitaciones promedio anuales del municipio de Pueblo Rico, las cuales se ven representadas en la figura 2.

**Figura 3.**

*Precipitación anual del municipio de Pueblo Rico (Risaralda, Pereira)*



**Nota.** La figura representa la cantidad de precipitación anual en el municipio de Pueblo Rico. Tomado de: Corporación Autónoma Regional de Risaralda. “Diagnóstico de riesgos ambientales municipio de Pueblo Rico Risaralda”. [En línea]. Disponible en: [https://nanopdf.com/download/pueblo-rico-risaralda-5b280ac2743da\\_pdf](https://nanopdf.com/download/pueblo-rico-risaralda-5b280ac2743da_pdf) [Acceso: Oct. 12, 2021]

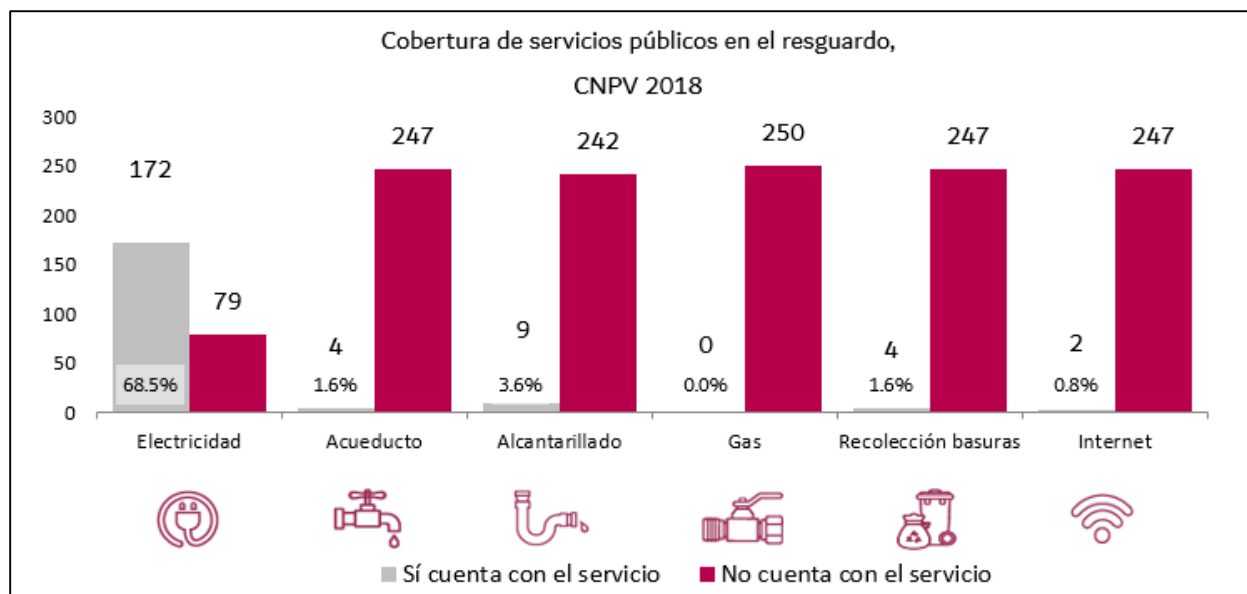
## 5.2. Población

De acuerdo a datos suministrados por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística -DANE, para el 2020, la población del resguardo indígena Embera Katio Gitó Dokabú era de aproximadamente 1484 Habitantes, incluyendo adultos y niños.

Con base a esta misma entidad, actualmente, el resguardo cuenta con el suministro servicios de electricidad en un 68,5%, de acueducto en un 1,6%, alcantarillado en un 3,6%, recolección de basuras en un 1,6% y solo un 0,8% de la población tiene acceso a redes wifi, donde se puede ver reflejado en la figura 4. Esto evidencia que las condiciones de vida de la comunidad no son adecuadas y presentan múltiples signos de pobreza, siendo un factor determinante para esta investigación la carencia de recursos energéticos que existe en la zona, ya que son de vital importancia para la óptima operación de cualquier sistema de tratamiento de aguas.

**Figura 4.**

*Datos demográficos comunidad Embera Katio Gitó Dokabú*



**Nota.** La figura representa los datos demográficos del resguardo. Tomado de: DANE Censo Nacional de Población y Vivienda 2018, “Resultados resguardos indígenas”. DANE Censo Nacional de Población y Vivienda 2018, [En línea]. Disponible: <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/grupos-eticos/informacion-tecnica> [Acceso: Oct. 12, 2021]

## 6. MARCO TEÓRICO

### 6.1. Operaciones unitarias

Los sistemas de tratamiento de agua potable son resultado de la implementación de diversos procesos y operaciones unitarias que se integran con el objetivo de transformar el agua subterránea o proveniente de cuerpos acuíferos o manantiales naturales a un estado totalmente apto para el consumo humano. Dentro de dichos procesos de transferencia utilizados en el tratamiento del agua para consumo humanos los de mayor importancia son los siguientes:

#### 6.1.1. Cribado

Proceso que consiste en hacer pasar el agua a través de tamices o rejillas, que tienen como función retener los sólidos que posean mayor tamaño que la separación de las barras, como lo son ramas, palos y toda clase de residuos sólidos. Dentro de esta clasificación, se incluye también, el proceso de micro cernido, que consiste básicamente en triturar las algas reduciendo su tamaño para que puedan ser removidas mediante sedimentación. [5] El procedimiento del cribado se efectúa haciendo pasar el material por una malla de acero tejida que dispone de una abertura determinada, llamada luz.

Este proceso se realiza como pretratamiento para el sistema de potabilización del agua, debido a que se requiere eliminar partículas mayores de 0.2 mm o cualquier sólido que puedan obstruir los procesos posteriores de tratamiento.

#### 6.1.2. Sedimentación

Proceso en el que se promueven las condiciones de reposo en el agua con el fin de remover, mediante fuerza gravitacional, las partículas en suspensión más densas. Se realiza por medio de desarenadores, presedimentadores, sedimentadores y decantadores, donde los materiales sólidos se depositan en el fondo. [5] El procedimiento se rige por la Ley de Stokes, la cual indica que las partículas se sedimentan más fácilmente cuando mayor es su diámetro y su peso específico, comparado con el del líquido y cuando menor es la viscosidad del líquido. Es importante distinguir que existen

dos tipos: la sedimentación de partículas discretas, como lo son la arena y otras similares, en las que no varía su tamaño, forma y peso en el proceso; y la sedimentación de partículas floculantes, las cuales son coloides aglomerados por lo que puede variar su peso, tamaño, volumen y densidad mientras se sedimentan.

La sedimentación se puede presentar de diversas formas, que depende de distintas variables y características, como las que se observan en la Tabla 1. También se observa en la figura 5 el comportamiento de la concentración de los sólidos presentes en el proceso de sedimentación de acuerdo al tipo anteriormente descrito.

**Tabla 1.**

*Tipos de sedimentación*

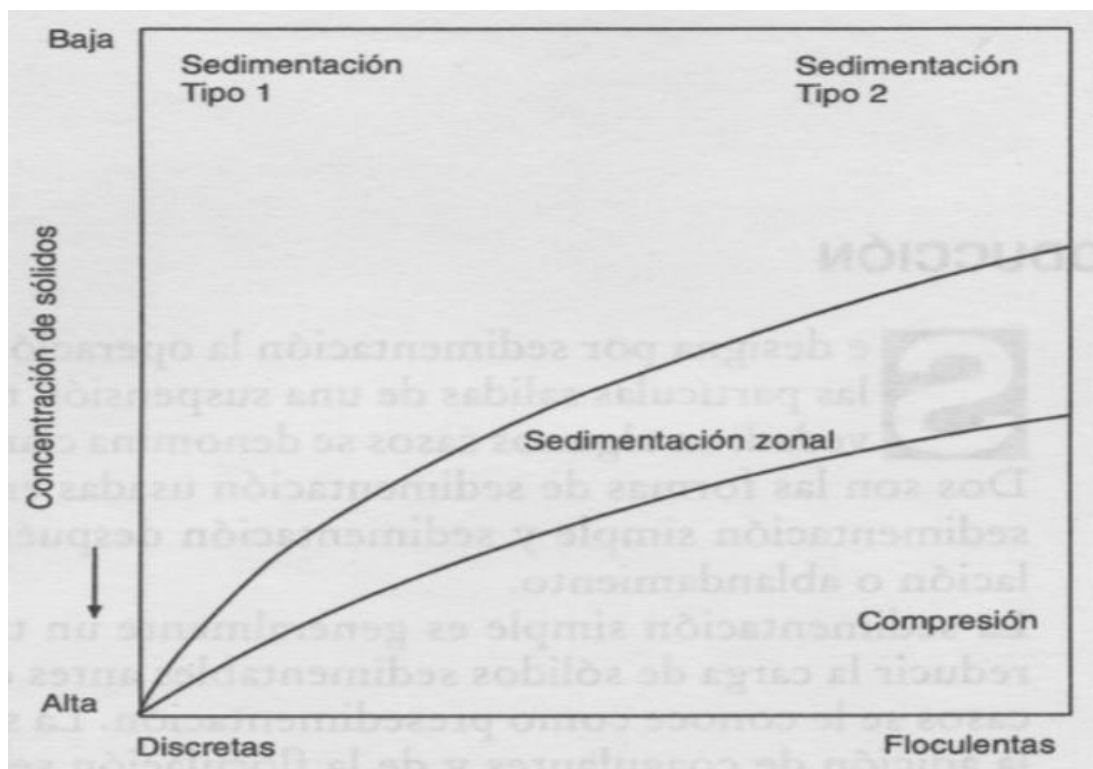
<b>Tipo de sedimentación</b>	<b>Características de los sólidos</b>	<b>Características de la sedimentación</b>	<b>Tipos de unidades de tratamiento</b>
I De partículas discretas	Partículas discretas y aisladas en soluciones diluidas	Cada una de las partículas sedimenta de forma independiente sin interacciones entre ellas ni con el fluido que las contiene	Desarenadores, muelles de sedimentación o presedimentadores
II De partículas floculantes	Partículas (coloides) floculantes o aglomerables	Las partículas se van aglomerando y forman coágulos o flóculos de mayor tamaño y peso	Sedimentadores de agua potable (con coagulación-floculación previas) y decantadores de aguas residuales.
III Zonal o interferida	Suspensiones de sólidos aglomerables de	La sedimentación es interferida, dada la cercanía entre partículas y se	Sedimentadores y decantadores de flujo ascendente y de mano de lodos

Tipo de sedimentación	Características de los sólidos	Características de la sedimentación	Tipos de unidades de tratamiento
	concentración intermedia	comportan como un bloque	
IV Por compresión	Suspensiones de alta concentración	Las partículas están en contacto íntimo entre ellas y su peso forma una masa compactada en el fondo de las unidades	Comparación de lodos en sedimentadores y en unidades de espesamiento de aguas residuales

**Nota.** Esta tabla muestra los tipos de sedimentación que presentan las partículas frente a los tipos de unidades que requiere cada uno. Tomado de: J. A. Romero Rojas. (1999). *Potabilización del agua*. (3ª edición) [En línea]. Disponible: [https://www.academia.edu/43327791/Romero\\_Rojas\\_Jairo\\_Alberto\\_Potabilización\\_Del\\_Agua](https://www.academia.edu/43327791/Romero_Rojas_Jairo_Alberto_Potabilización_Del_Agua)

**Figura 5.**

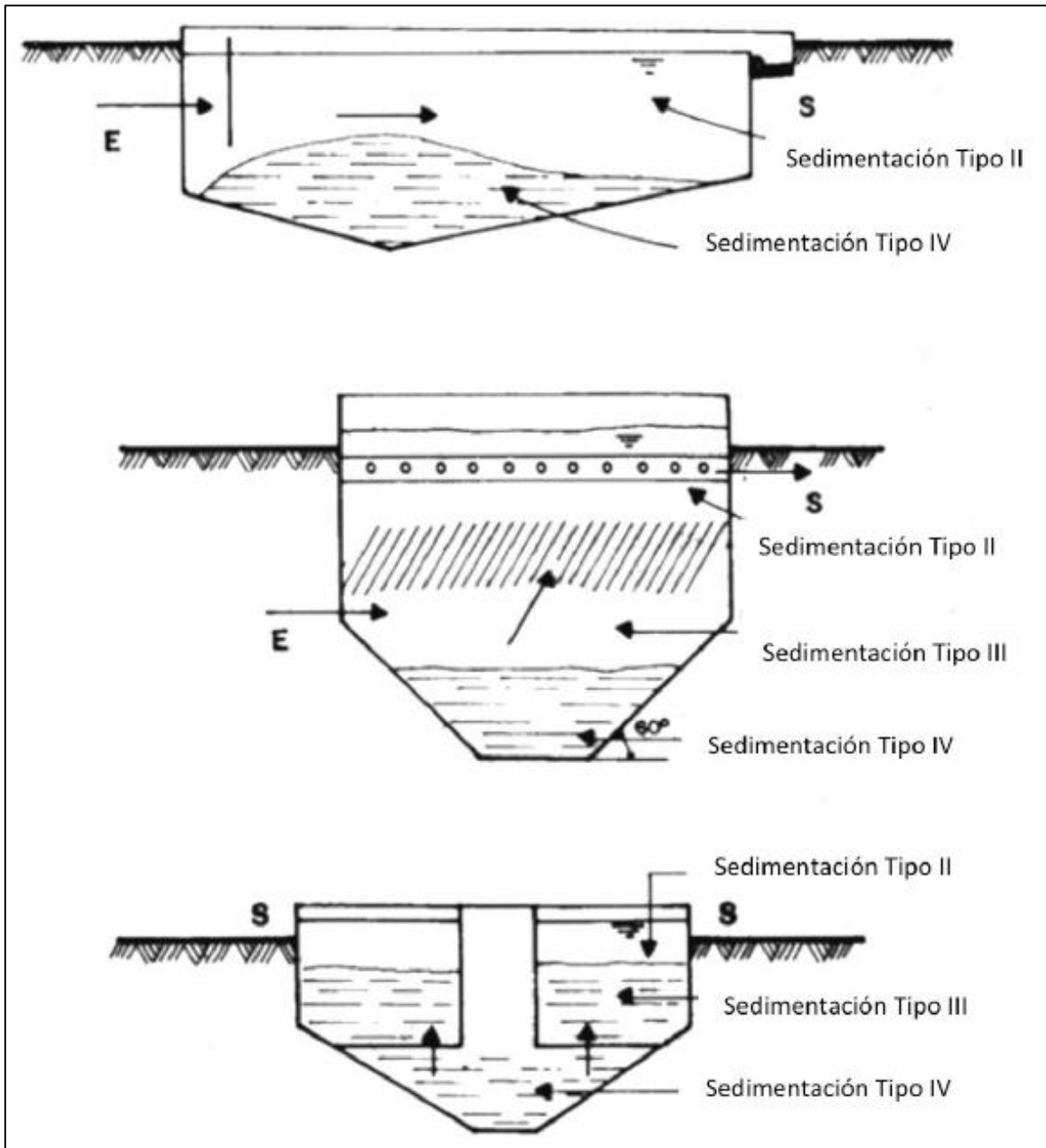
*Diagrama paragenético de los tipos de sedimentación*



**Nota.** La figura representa la concentración de sólidos de acuerdo al tipo de sedimentación que presenta las partículas. Tomado de: J. A. Romero Rojas. (1999). *Potabilización del agua*. (3ª edición) [En línea]. Disponible: [https://www.academia.edu/43327791/Romero\\_Rojas\\_Jairo\\_Alberto\\_Potabilización\\_Del\\_Agua](https://www.academia.edu/43327791/Romero_Rojas_Jairo_Alberto_Potabilización_Del_Agua)

**Figura 6.**

*Tipos de sedimentación para diferentes tipos de unidades*



**Nota.** La figura representa los diferentes tipos de sedimentación que se presentan en distintas unidades de tratamiento. Tomado de: W. A. Lozano Rivas. (2015). *Potabilización del agua: principios de diseño, control de procesos y laboratorio: Diseño de sedimentadores*. (1ª edición), [En línea].

Disponible:

<https://search-ebSCOhost-com.ezproxy.uamerica.edu.co/login.aspx?direct=true&db=nlebk&AN=1593375&lang=es&site=eds-live&scope=site>



Dentro de este proceso se dispone de un tanque de sedimentación, siendo para un caso ideal que presenta 4 zonas diferentes: primeramente se presenta una zona de entrada, en la que se asegura un reparto uniforme del caudal en toda el área transversal del tanque, evitando zonas muertas, logrando de esta forma un flujo a pistón con trayectorias horizontales en la zona de sedimentación; luego se tiene una zona salida, que de la misma manera asegura un flujo uniforme que no genere turbulencias que puedan volver a suspender partículas ya sedimentadas; en tercer lugar se tiene una zona de lodos, en la que se van acumulando las partículas sedimentadas, con el fin de que no haya interferencias con las partículas que se decantan en la zona de sedimentación y posteriormente puedan ser retiradas, de tal forma que, toda partícula que alcanza dicha zona es considerada removida del proceso; y finalmente una zona de sedimentación, la cual proporciona un espacio lo suficientemente grande para que las partículas se asienten por efecto de la gravedad, sin que estas interfieran con las otras 3 zonas.

Se debe tener en cuenta que existen algunos factores que afectan la eficiencia de la unidad de sedimentación, como lo son los aspectos de la calidad del agua cruda frente a sólidos suspendidos y turbiedad, el peso y grado de hidratación del floculo formado, la forma y tipo del sedimentador, la operación y mantenimiento de la unidad, tipo de dosis y coagulante usado en el proceso de coagulación y el control y calidad de los tratamientos usados previamente de la sedimentación. [5]

### **6.1.3. Flotación**

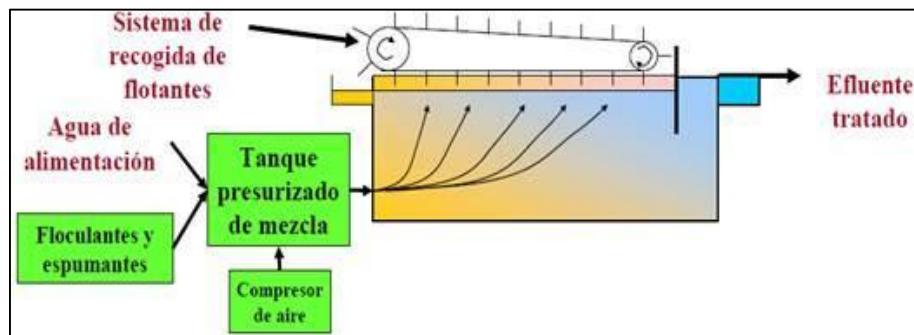
Proceso que tiene el objetivo de promover condiciones de reposo para que los sólidos presentes, cuya densidad es menor que la del agua, asciendan a la superficie de la unidad, y de esta forma puedan ser retirados por desnatado. Para mejorar la eficiencia del proceso se debe realizar la utilización de agentes de flotación, siendo sustancias orgánicas e inorgánicas que promueven, intensifican y modifican las condiciones óptimas del proceso. [5] La eliminación se consigue disolviendo el aire en el agua a presión y luego liberando el aire a presión atmosférica en una cuba de tanque de flotación, luego el aire es liberado por medio de burbujas, las cuales se adhieren a la materia en

suspensión haciendo que este flote a la superficie del agua y realizar su posterior eliminación.

El proceso en general separa las partículas sólidas del líquido mediante la saturación del agua con aire disuelto a presión en una corriente de reciclaje proveniente del efluente clarificado de la flotación por aire disuelto. Esta corriente de reciclaje, que se encuentra presurizada entre 4 y 6 bar, es denominada corriente híper saturada, y se mezcla con el efluente ingresante en una cámara de contacto interna. En esta cámara las burbujas de aire microscópicas se adhieren a los sólidos y los hacen flotar hacia la superficie, de manera que forman un lecho flotante de lodos.

**Figura 7.**

*Proceso de flotación*



**Nota.** La figura representa el proceso de flotación para el tratamiento de agua potable. SPENA Group. (s.f.). "Tratamiento Primario del Agua y Aguas Residuales – Sistema de Flotación". [En línea]. <https://spenagroup.com/tratamiento-primario-del-agua-aguas-residuales-sistema-flotacion/> [Acceso: Octubre 12, 2021]

#### **6.1.4. Filtración**

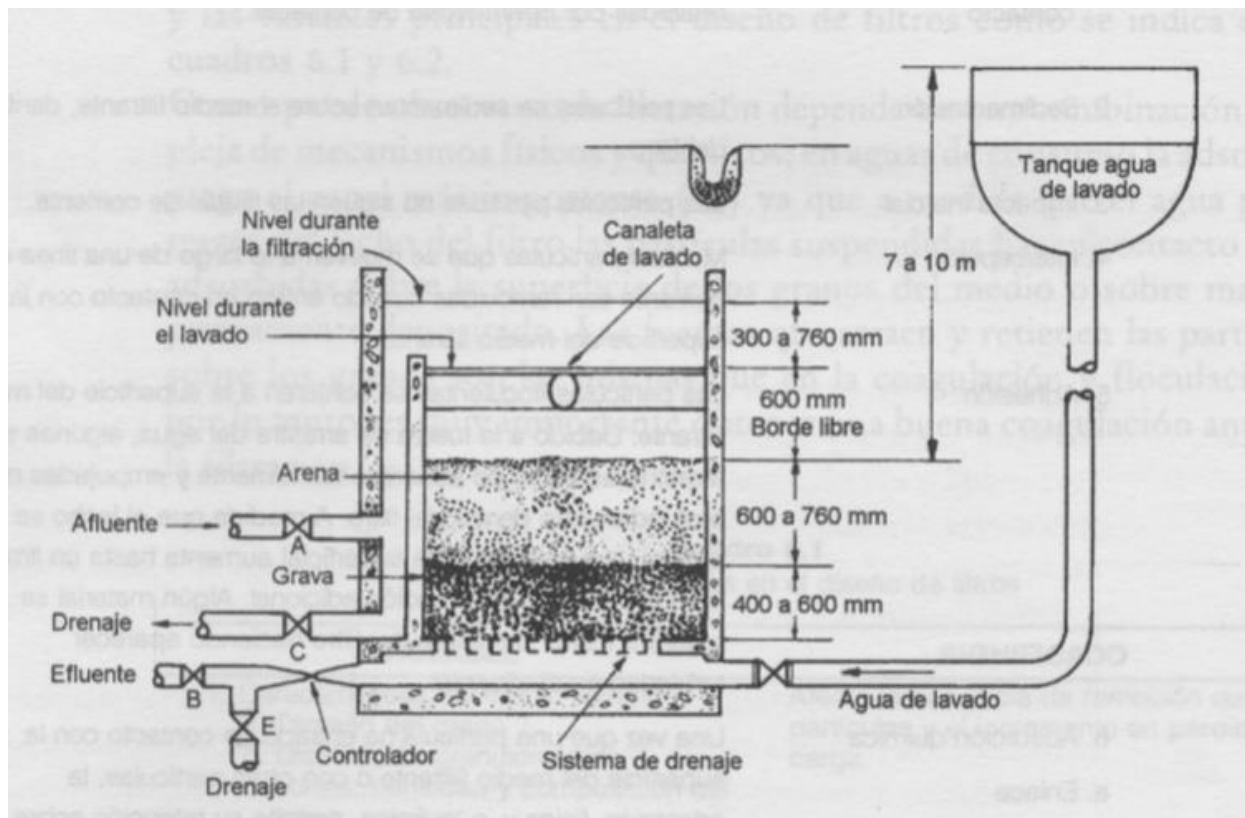
Proceso que consiste pasar el agua a través de un filtro o medio filtrante, normalmente de arena, con el fin de separar uno o más componentes suspendidos. En este actúan

una serie de mecanismos de remoción que dependen de las características de las suspensiones en el agua y el medio filtrante para aumentar la eficiencia. [6]

En cuanto a tratamientos de agua, la filtración busca la reducción de partículas en suspensión, como residuos de arena, tierra, metales pesados, entre otros; los cuales actúan produciendo malos olores, mayor turbidez y problemas en la salud de las personas que consumen dicha fuente.

### Figura 8.

#### Proceso de filtración



**Nota.** La figura representa el proceso de filtración que es utilizado para tratamiento de agua potable. Tomado de: J. A. Romero Rojas. (1999). *Potabilización del agua*. (3ª edición) [En línea]. Disponible: [https://www.academia.edu/43327791/Romero\\_Rojas\\_Jairo\\_Alberto\\_Potabilización\\_Del\\_Agua](https://www.academia.edu/43327791/Romero_Rojas_Jairo_Alberto_Potabilización_Del_Agua)

La filtración depende de una combinación compleja de mecanismos físicos y químicos; para aguas de consumo, la adsorción juega un papel fundamental, puesto que a medida que el agua pasa a través del lecho filtrante, las partículas suspendidas hacen contacto y son adsorbidas sobre la superficie de los granos del medio previamente depositado. Las fuerzas que atraen y retienen las partículas sobre los granos se comportan de la misma manera que en la coagulación y floculación, por lo tanto, se requiere obtener una buena coagulación antes del proceso de filtración.

Este proceso, además de retirar la turbiedad remanente, elimina, junto con las partículas, gran parte de los microorganismos patógenos, de los cuales en su mayoría son resistentes a la desinfección. Dicho procedimiento se puede presentar en dos zonas: una filtración en superficie, la cual se presenta cuando las partículas en suspensión son más grandes que el tamaño de los poros del medio filtrante y quedan retenidas sobre la superficie del lecho; y una filtración en volumen en la que las partículas suspendidas tienen tamaños menores que los poros del medio filtrante, penetrando dicho filtro mediante la coagulación de mecanismos de remoción propios de los lechos porosos. [7]

Ahora bien, en cuanto al diseño de filtros, existen diversas variables y múltiples mecanismos que se presentan y son relevantes, como los que se presentan a continuación de acuerdo a lo descrito por el autor Romero: [7]

#### **Variables:**

- Características del medio filtrante, dentro de las cuales se encuentran el tamaño de grano, la distribución granulométrica, la forma, la densidad, la composición del grano y la carga del medio; las cuales afectan la eficiencia de remoción de partículas y el incremento en pérdida de carga.
- Porosidad del lecho filtrante, el cual determina la cantidad de sólidos que pueden almacenarse en el filtro frente al tamaño que tienen las partículas sólidas que se encuentren en el agua a purificar.

- Profundidad del lecho filtrante, que afecta la pérdida de carga y la duración del proceso.
- Tasa de filtración que permite determinar el área requerida y la pérdida de carga, y adicionalmente afecta la calidad del efluente.
- Pérdida de carga disponible, la cual se presenta como una variable de diseño del proceso de filtración, debido a que el lecho que se utiliza influye en las pérdidas de energía que sufre el agua a purificar.
- Características del afluente, como lo son la concentración de sólidos suspendidos, el tamaño y distribución del flóculo, la resistencia del flóculo, la carga eléctrica del flóculo y las propiedades del fluido, los cuales afectan las características de remoción del filtro.

**Mecanismos:**

- Cribado, el cual existe como un mecanismo en el que las partículas más grandes que los poros del medio son retenidas mecánicamente, y como oportunidad de contacto en que las partículas más pequeñas que los poros del medio son retenidas por el mismo.
- Sedimentación, en el cual se sedimentan sobre el medio filtrante o dentro del filtro.
- Impacto inercial, en el que las partículas pesadas no siguen las líneas de corriente.
- Intercepción, en el cual se presentan muchas partículas que se mueven a lo largo de una línea de corriente, estas son removidas al entrar en contacto con la superficie del medio filtrante.

- Adhesión, donde las partículas floculentas se adhieren a la superficie del medio filtrante; debido a la fuerza de arrastre del agua, algunas son arrastradas antes de adherirse fuertemente y empujadas más profundamente dentro del filtro.
- Adsorción química, este puede ser por enlace e interacción química, o física, que son por fuerzas electrostáticas, electrocinéticas y de Vander Waals. Una vez que una partícula ha entrado en contacto con la superficie del medio filtrante, la adsorción tanto física como química permite su retención sobre dichas superficies.
- Floculación, en el que las partículas más grandes capturan partículas más pequeñas y forman partículas aún más grandes.
- Crecimiento biológico, mecanismo que reduce el volumen del poro y promueve la remoción de partículas que se encuentren en el agua a tratar.

Para diseños de filtros rápidos se debe tener en cuenta la altura estructural total, la cual varía entre 3.5 y 5 m; donde la mayoría de las instalaciones que se requieren para el tratamiento implica la existencia de pretratamientos de clarificación antes de entrar al proceso de filtración. [5], [7], [8]

Se establece la hidráulica de la filtración que es abordada fundamentalmente por las operaciones de filtrabilidad, pérdida de carga y tiempo en funcionamiento que transcurre entre lavados consecutivos; y el lavado de los filtros conocido como retrolavado, teniendo en cuenta el deterioro en la calidad del efluente, la pérdida de carga, el tiempo que se requiere para dicho lavado y su respectiva hidráulica. [5], [7]

Las características de los medios filtrantes para filtros rápidos se establecen de la siguiente manera:

- Para lechos de arena se establece una profundidad para el lecho de 0.6 a 0.75 m y para la grava de 0.3 a 0.45 m, un tamaño efectivo de grano entre 0.45 y 0.55 mm, un

coeficiente de uniformidad entre 1.2 y 1.7, un ciclo de uso de 12 a 36 h, una pérdida de carga inicial de 0.3 m y final admitida de 2.4 a 3 m, y una necesidad de agua de lavado entre el 2 y 4% del agua filtrada y de un drenaje con tubería perforada o falsos fondos. Utilizados en filtros lentos y rápidos. [5], [7]

- Para lechos de antracita se establece una profundidad de lecho entre 0.6 y 0.75 m, un tamaño efectivo de grano entre 0.6 y 0.9 mm, un coeficiente de uniformidad menor o igual a 1.5, un ciclo de uso de 12 a 36 h, una pérdida de carga inicial de 0.3 m y final admitida de 2.4 a 3 m, y una necesidad de agua de lavado del 6% del agua filtrada. Utilizados en filtros rápidos y de alta tasa. [5]
- Para lechos de arena y antracita se establece una profundidad de lecho de arena entre 0.2 y 0.4 m, una profundidad de lecho de antracita entre 0.3 y 0.55 m, una profundidad total de lecho filtrante entre 0.6 y 0.9 m, un ciclo de uso de 12 a 36 h, una pérdida de carga inicial de 0.3 m y final admitida de 2.4 a 3 m, y una necesidad de agua de lavado del 6% del agua filtrada y de drenaje de tubería perforada o falsos fondos. Utilizados en filtros de alta tasa. [5], [7]

Dependiendo de las características físicas de las partículas que se involucran en el proceso de filtración existen diferentes tipos de filtración: la microfiltración, la ultrafiltración y la nanofiltración.

#### **6.1.5. Microfiltración**

En este proceso de filtración el tamaño de la partícula filtrada está entre 0,1 y 10 micrones.

#### **6.1.6. Ultrafiltración**

Esta clasificación permite la separación de moléculas con un peso molecular superior a los  $10^3$  Dalton/g-mol. Se disponen de membranas que logran la separación y concentración de proteínas, así como la desinfección del agua por medio de la retención de bacterias y virus, etc.

### **6.1.7. Nanofiltración**

Este proceso realiza la filtración de partículas con peso molecular superior a los 200 Dalton/g-mol.

### **6.1.8. Decantación**

Proceso en el cual con base en la diferencia de densidad de los componentes de una mezcla inmiscible se separa un componente del otro, donde el más ligero se retira por la parte superior del decantador y el más pesado por la parte baja.

### **6.1.9. Transferencia de iones**

Procesos en los cuales se utilizan reacciones químicas como agentes separadores para el sistema de purificación del agua.

6.1.9.a. Coagulación química. La coagulación puede entenderse como la desestabilización eléctrica de algunas partículas mediante la adición de sustancia química que son los coagulantes. Esta operación se efectúa en unidades y tanques de mezcla rápida, en los cuales el agua se somete a agitación muy intensa para formar una solución homogénea de los coagulantes con el agua en el menor tiempo posible. [9]

También se entiende que “la coagulación química consiste en adicionar al agua una sustancia que tiene propiedades coagulantes, la cual transfiere sus iones a la sustancia que se desea remover, lo que neutraliza la carga eléctrica de los coloides para favorecer la formación de flóculos de mayor tamaño y peso”. [5]

También es conocida como mezcla rápida, siendo una operación empleada para el tratamiento del agua con el fin de dispersar diferentes sustancias químicas y gases, donde tiene el propósito de dispersar de manera rápida y uniformemente el coagulante a través de toda la masa de agua.

La mezcla rápida se emplea mediante mezcladores hidráulicos o mecánicos, provocando turbulencia en el régimen del agua, tales como resaltos hidráulicos en canales, canaletas



Parshall, vertederos rectangulares, tuberías de succión de bombas, mezcladores mecánicos en línea, rejillas difusoras, chorros químicos y tanques con equipo de mezcla rápida. [7], [10]

En los mezcladores hidráulicos la mezcla se emplea generando turbulencia en el régimen del flujo gracias a la gravedad y en los mezcladores mecánicos la mezcla es inducida a través de impulsores rotatorios del tipo hélice, los cuales generan corrientes axiales fuertes con una alta velocidad de hasta 2000 rpm. [5]

Los tanques mecánicos de mezcla rápida empleados para el tratamiento del agua, se establecen con base al número de cámaras, ya sean de manera horizontal o vertical, y para mejorar la mezcla, el agua ingresa por la parte inferior del tanque y sale por la parte superior del tanque rebosando al canal que conecta junto con los floculadores. [5]

Es recomendable el uso frecuente de mezcladores rápidos hidráulicos para sistemas de potabilización debido a la diferencia de costos de operación y mantenimiento que tienen frente a los mecánicos.

6.1.9.a.i. Mezcladores rápidos mecánicos. Para el diseño de los tanques de mezcla rápida mecánicos se establecen varios criterios de diseño que se observan en la Tabla 3 recomendada por el INSFOPAL, para ello se requiere de un gradiente de mezcla que hace referencia a la cantidad de energía disipada en el mezclador, el cual depende de la potencia del motor, la viscosidad del agua, el volumen del tanque y el tiempo de mezcla, donde el gradiente de diseño se establece según la Tabla 2.

**Tabla 2.***Gradiente de diseño del mezclador rápido*

TIEMPO DE CONTACTO (s)	G (s <sup>-1</sup> )
20	1000
30	900
40	790
> 40	700

**Nota.** Esta tabla muestra la variación del gradiente de mezcla de mezcladores rápidos mecánicos a diferentes tiempos de contacto. Tomado de: W. A. Lozano Rivas. (2015). *Potabilización del agua: principios de diseño, control de procesos y laboratorio: Diseño de mezcladores rápidos*. (1ª edición), [En línea]. Disponible: <https://search-ebSCOhost-com.ezproxy.uamerica.edu.co/login.aspx?direct=true&db=nlebk&AN=1593375&lang=es&site=eds-live&scope=site>

**Tabla 3.***Criterios de diseño del mezclador rápido*

PARÁMETRO	VALOR O RANGO
Tiempo de contacto (s)	10 - 90
Número de Reynolds	≥ 100000
Velocidad tangencial de las paletas (m/s)	0.6

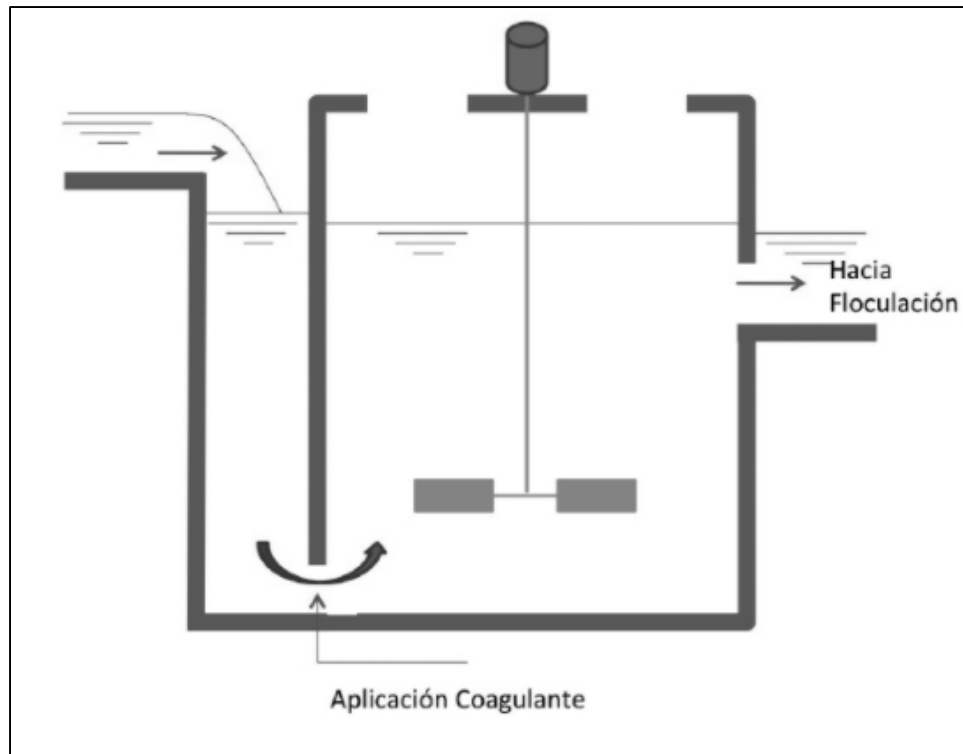
**Nota.** Esta tabla muestra los valores o rangos de los criterios de diseño de mezcladores rápidos mecánicos. Tomado de: W. A. Lozano Rivas. (2015). *Potabilización del agua: principios de diseño, control de procesos y laboratorio: Diseño de mezcladores rápidos*. (1ª edición), [En línea]. Disponible: <https://search-ebSCOhost-com.ezproxy.uamerica.edu.co/login.aspx?direct=true&db=nlebk&AN=1593375&lang=es&site=eds-live&scope=site>

Comúnmente se utilizan con mayor frecuencia cámaras de mezcla sencillas como se observa en la figura 9 con tiempos de contacto de 20 segundos y gradientes de 1000s<sup>-1</sup>;

los cuales según Hudson se recomiendan los tiempos más bajos posibles y el gradiente no menor al indicado anteriormente.

**Figura 9.**

*Mezclador rápido mecánico de una cámara*



**Nota.** La figura representa una unidad de mezcla rápida de manera mecánica de una sola cámara. Tomado de: W. A. Lozano Rivas. (2015). *Potabilización del agua: principios de diseño, control de procesos y laboratorio: Diseño de mezcladores rápidos*. (1ª edición), [En línea]. Disponible: <https://search-ebSCOhost-com.ezproxy.uamerica.edu.co/login.aspx?direct=true&db=nlebk&AN=1593375&lang=es&site=eds-live&scope=site>

La ventaja de los mezcladores mecánicos sobre los hidráulicos es la capacidad de variar el gradiente de mezcla, modificando la velocidad de agitación de la turbina que posee el mezclador. Por lo cual, su principal desventaja es la dependencia de energía eléctrica

para lograr su buen funcionamiento, lo que conlleva costos asociados al consumo de este.

6.1.9.a.ii. Mezcladores rápidos hidráulicos. Estos tipos de mezcladores son usados frecuentemente para caudales de agua bajos, menores a los 1000 L/s, los cuales utilizan el resalto hidráulico o caída de agua para aprovechar la turbulencia que se genera, lo cual se requiere de una cabeza disponible suficientemente alta para obtener dicho movimiento del agua y en caso de no tener el dispositivo de dicha manera, se opta por el uso de canaletas Parshall u otros dispositivos que generen ese movimiento de resalto. [5]

Las canaletas Parshall son recomendadas para caudales sólo por encima de los 100 L/s, ya que a menores caudales es muy difícil llegar a obtener el resalto hidráulico efectivo y estable. También se recomienda utilizar mezcladores hidráulicos como vertederos rectangulares para caudales entre 50 y 100 L/s, y vertederos triangulares para caudales por debajo de los 50 L/s, que permiten lograr un resalto hidráulico efectivo para el proceso de coagulación. [5]

Cuando se tienen caudales por encima de los 1000 L/s, se opta por el uso de los vertederos Creager o Wes Estándar, ya que son muy usados en vertederos de rebose para represas donde se requieren de volúmenes de agua muy grandes. [5]

La ventaja que poseen estos mezcladores frente a los mecánicos es que no requieren de un gasto energético adicional, debido al uso exclusivo de la gravedad para generar turbulencia y así realizar el proceso de coagulación sin requerir de mecanismos externos como equipos, repuestos o piezas móviles asociados a dicho proceso.

Los dispositivos más usados para realizar dicho proceso son:

- Vertederos
- Canaletas Parshall

- Rampas de mezcla
- Tubos Venturi
- Dispersores de tubos perforados
- Tanques con baffles de mezcla

Para el diseño de mezcladores rápidos hidráulicos, los criterios de diseño más relevantes se observan en la Tabla 4.

**Tabla 4.**

*Parámetros de diseño de mezcladores rápidos hidráulicos*

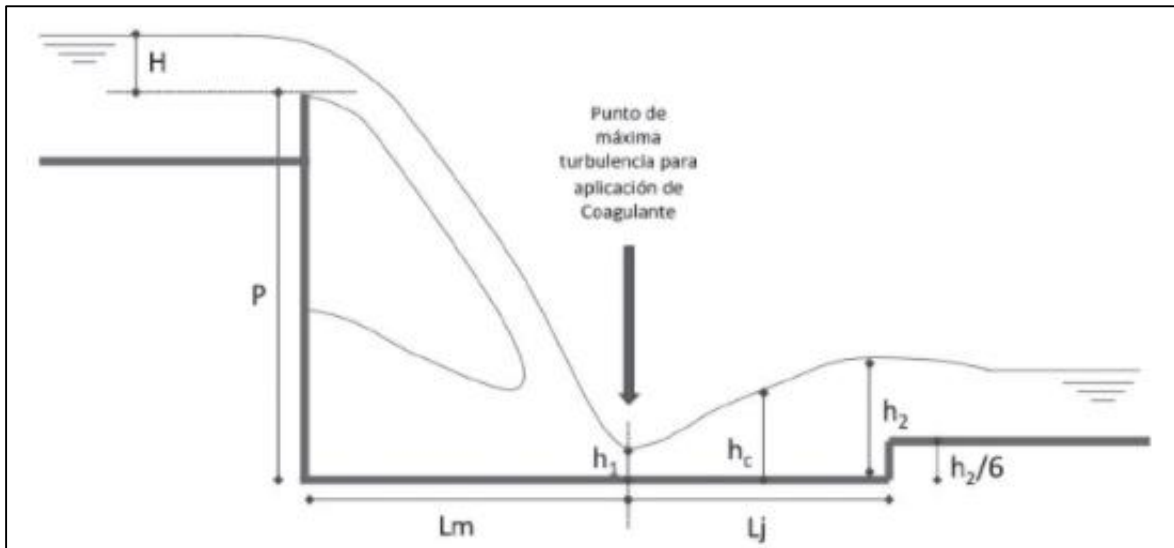
PARÁMETRO	VALOR O RANGO
Gradiente de mezcla (s <sup>-1</sup> )	1000 a 3000
Tiempo óptimo de mezcla (s)	1 a 5 (Preferible ≤ 1)
Número de Froude	4.5 a 9.0

**Nota.** Esta tabla muestra los valores o rangos de los criterios de diseño de mezcladores rápidos hidráulicos. Tomado de: W. A. Lozano Rivas. (2015). *Potabilización del agua: principios de diseño, control de procesos y laboratorio: Diseño de mezcladores rápidos*. (1<sup>a</sup> edición), [En línea]. Disponible: <https://search-ebSCOhost-com.ezproxy.uamerica.edu.co/login.aspx?direct=true&db=nlebk&AN=1593375&lang=es&site=eds-live&scope=site>

De acuerdo a los parámetros establecidos se recomienda evitar gradientes entre 800 y 1000 s<sup>-1</sup>, debido a que se pueden crear condiciones inestables y mezcla inapropiada.

**Figura 10.**

*Resalto hidráulico en un vertedero*



**Nota.** La figura representa una unidad de mezcla rápida de manera hidráulica mediante un vertedero. Tomado de: W. A. Lozano Rivas. (2015). *Potabilización del agua: principios de diseño, control de procesos y laboratorio: Diseño de mezcladores rápidos*. (1ª edición), [En línea]. Disponible: <https://search-ebSCOhost-com.ezproxy.uamerica.edu.co/login.aspx?direct=true&db=nlebk&AN=1593375&lang=es&site=eds-live&scope=site>

6.1.9.a.iii. Agentes coagulantes. Los coagulantes que son empleados frecuentemente para la purificación del agua son los que se encuentran en la Tabla 5.

**Tabla 5.**

*Agente coagulante de acuerdo con la alcalinidad del agua a tratar*

COAGULANTE	ALCALINIDAD REQUERIDA (mg/L POR CADA mg/L DE COAGULANTE)
Alumbre $Al_2(SO_4)_3$	0.5 $CaCO_3$
	0.28 CaO
	0.37 $Ca(OH)_2$
	0.53 $Na_2CO_3$

COAGULANTE	ALCALINIDAD REQUERIDA (mg/L POR CADA mg/L DE COAGULANTE)
Cloruro férrico FeCl <sub>3</sub>	0.92 CaCO <sub>3</sub> 0.52 CaO 0.68 Ca(OH) <sub>2</sub> 0.98 Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>
Sulfato férrico Fe <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	0.75 CaCO <sub>3</sub> 0.42 CaO 0.55 Ca(OH) <sub>2</sub> 0.79 Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>

**Nota.** Esta tabla muestra la alcalinidad de diferentes coagulantes utilizados en el proceso de coagulación o mezcla rápida. Tomado de: W. A. Lozano Rivas. (2015). *Potabilización del agua: principios de diseño, control de procesos y laboratorio: Sustancias usadas en la coagulación*. (1ª edición), [En línea]. Disponible: <https://search-ebSCOhost.com.ezproxy.uamerica.edu.co/login.aspx?direct=true&db=nlebk&AN=1593375&lang=es&site=eds-live&scope=site>

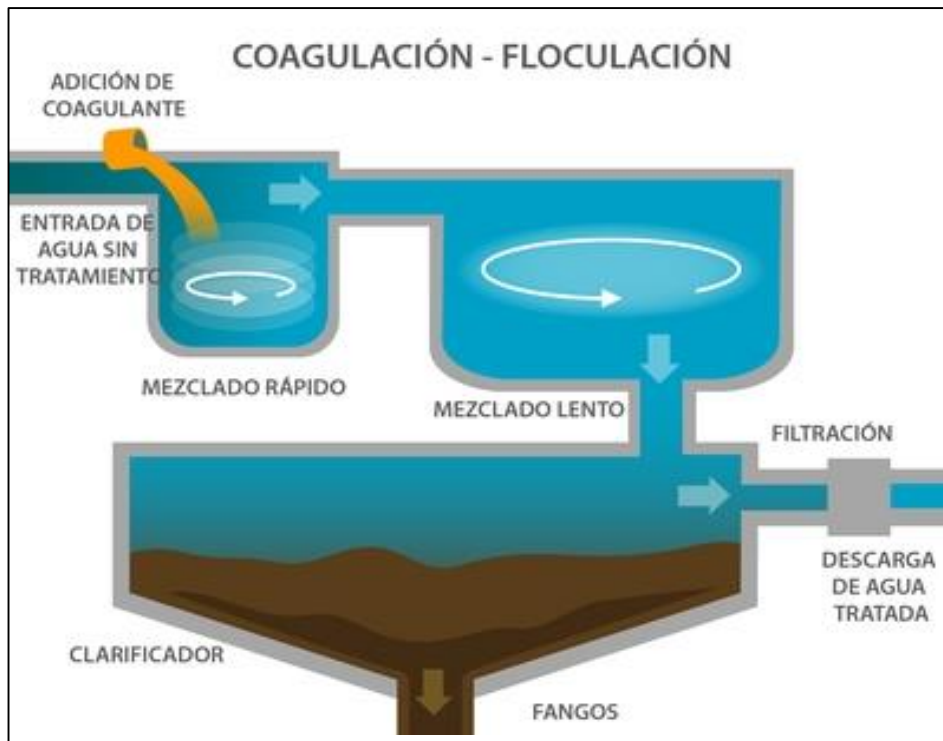
Las sales de aluminio, en este caso alumbre, forma un floc no muy pesado, donde es más usada en sistemas de tratamiento de agua potable gracias a su facilidad de uso y su bajo costo, comercialmente se obtiene de forma líquida y sólida, sin embargo, este coagulante se debe encontrar en solución (generalmente al 1%), por lo tanto, debe diluirse en agua antes de su aplicación durante 5 minutos. Y debe estar en un rango de pH entre 6 y 8 unidades, para que no afecte las condiciones en el proceso de coagulación. En caso de suministrar el coagulante de forma líquida se dosifica en solución al 50%, sin dilución.

Con respecto a las sales de hierro, estos presentan una formación de flóculos más pesados y tienen la ventaja de tener un pH óptimo menos restrictivo, donde se utiliza frecuentemente en caso de sólo requerir un incremento en la eficiencia de los sedimentadores o si el pH del agua cruda restringe el uso de alumbre como coagulante.

6.1.9.b. Floculación. Es un proceso de agregación de partículas en dos pasos en el que un gran número de partículas pequeñas forman una pequeña cantidad de grandes flóculos. [11]

**Figura 11.**

*Proceso de coagulación-floculación*



**Nota.** La figura representa el proceso de coagulación-floculación para el tratamiento de agua potable. Tomado de: F. Ramirez Quirós. (s.f.), "Sistemas de abastecimiento de agua potable", [En línea]. Disponible: <http://www.elaguapotable.com/coagulacion-floculacion.htm> [Acceso: Octubre 12, 2021]

El proceso de floculación implica la agregación de coloides luego de la coagulación previa y se realiza la agitación del agua con las partículas coloidales desestabilizadas, de tal manera que se facilite el encuentro entre partículas para la conformación de aglomerados de suficiente tamaño y peso para lograr una buena sedimentación debido a la gravedad.



“El fenómeno de floculación puede dividirse en floculación pericinética, que corresponde al contacto entre coloides desestabilizados, causado por los movimientos erráticos de estos debido a la energía térmica e iónica del agua, conocido como movimiento browniano; y en floculación ortocinética, que corresponde al mismo contacto que tiene la pericinética, pero es propiciado a la suave agitación del agua, inducida por el movimiento de una turbina”. [5]

Al igual que los mezcladores rápidos, la mezcla lenta se realiza mediante dispositivos mecánicos o hidráulicos; entre los floculadores hidráulicos, el más utilizado son tanques divididos por tabiques; y para los floculadores mecánicos se induce la mezcla lenta en el agua mediante el movimiento de unas paletas ancladas a un motor. [5]

Las desventajas que contiene los floculadores mecánicos son debidas a los gastos energéticos y sus consecuentes costos en operación y mantenimiento, mientras que las fortalezas radican en la facilidad para realizar control del gradiente de mezcla mediante cambios en la velocidad de giro de las paletas. Para el diseño de floculadores se establecen criterios generales, descritos en la Tabla 6.

**Tabla 6.**

*Criterios generales de diseño de floculadores*

PARÁMETRO	VALOR O RANGO
Número mínimo recomendable de secciones o cámaras en el floculador con gradientes distintos	2 secciones para hidráulicos 3 cámaras para mecánicos
Gradientes óptimos de mezcla (s-1)	20 a 60
Tiempos de retención hidráulica (min)	10 a 40
Número de Camp (Gradiente*Tiempo de retención hidráulica)	20000 a 150000
Número mínimo de unidades (recomendables)	2 para potabilizadoras pequeñas 3 para potabilizadoras grandes

**Nota.** Esta tabla muestra los valores o rangos de los criterios generales de diseño de unidades de floculación. Tomado de: W. A. Lozano Rivas. (2015). *Potabilización del agua: principios de diseño, control de procesos y laboratorio: Diseño de mezcladores lentos o floculadores*. (1ª edición), [En línea]. Disponible: <https://search-ebSCOhost.com.ezproxy.uamerica.edu.co/login.aspx?direct=true&db=nlebk&AN=1593375&lang=es&site=eds-live&scope=site>

6.1.9.c. Precipitación química. Proceso que consiste en adicionar al agua una sustancia química soluble cuyos iones reaccionan con los de la sustancia que se desea remover, formando un precipitado.

6.1.9.d. Intercambio iónico. Este proceso consiste en un intercambio de iones entre la sustancia que se desea remover y un medio sólido a través del cual se hacer pasar el flujo de agua.

6.1.9.e. Absorción. Consiste en la remoción de iones y moléculas presentes en la solución, aumentando la concentración en la superficie de un medio adsorbente, mediante la acción de las fuerzas de interfaz.

6.1.9.f. Aireación. Proceso mediante el cual el agua se pone en contacto íntimo con el aire con el propósito de modificar las concentraciones de sustancias volátiles contenidos en ella, que se efectúa mediante caídas de agua en escaleras, cascadas, chorros y también aplicando el gas a la masa de agua mediante aspersion o burbujeo.

Para la purificación del agua se agrega oxígeno mediante aireación para la remoción de hierro y manganeso, cumpliendo sus objetivos mediante el arrastre o barrido de las sustancias volátiles causado por la mezcla turbulenta del agua con el aire.

Los principales aireadores que son utilizados comúnmente para la purificación del agua son de toberas, cascadas, canales inclinados y bandejas, por lo cual se establecen los tiempos de contacto mínimos para la absorción o desgasificación de gases comunes en la potabilización del agua que se observan en la Tabla 7. [5]

**Tabla 7.**

*Tiempos de contacto de absorción o desgasificación*

OBJETIVO	TIEMPO MÍNIMO DE CONTACTO (SEGUNDOS)
Remoción de CO <sub>2</sub>	0.7 a 1.0
Remoción de Compuestos Orgánicos Volátiles (olor y sabor)	1.0 a 1.5
Remoción de H <sub>2</sub> S	1.5 a 2.0
Absorción de O <sub>2</sub>	0.4 a 0.6

**Nota.** Esta tabla muestra los tiempos de contacto para cada objetivo del proceso de aireación como tratamiento preliminar del agua. Tomado de: W. A. Lozano Rivas. (2015). *Potabilización del agua: principios de diseño, control de procesos y laboratorio: Diseño de unidades preliminares*. (1ª edición), [En línea]. Disponible: <https://search-ebSCOhost-com.ezproxy.uamerica.edu.co/login.aspx?direct=true&db=nlebk&AN=1593375&lang=es&site=eds-live&scope=site>

6.1.9.f.i. Aireadores de fuente o surtidores. Consisten en una serie de toberas fijas, sobre una malla de tuberías, que dirigen el agua hacia arriba de manera vertical o en un ángulo inclinado, de tal manera que el agua se rompa en pequeñas gotas. Es utilizado frecuentemente como tratamientos preliminares del agua para la remoción de CO<sub>2</sub> y la adición de oxígeno.

6.1.9.f.ii. Bandejas de aireación. Consiste en una serie de bandejas equipadas con ranuras, fondos perforados o mallas de alambre, sobre los cuales se distribuye el agua y se deja caer a un tanque receptor en la base, usualmente contienen algún medio grueso de material adsorbente cuya finalidad es facilitar el intercambio de gases y mejorar la distribución de flujo, el cual se establecen varios criterios y características para el diseño de las bandejas de aireación frente a la purificación del agua, los cuales se representan en la Tabla 8 y

Tabla 9. [5]

**Tabla 8.**

*Parámetros de diseño de bandejas de aireación*

PARÁMETRO	VALOR O RANGO
Carga Hidráulica	430 a 860 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> *d (0.1 a 0.2 m <sup>2</sup> por cada L/s)
Altura total de la torre de aireación (m)	2 a 3 (eventualmente, dependiendo del número de bandejas, puede alcanzar alturas superiores a los 5 m)
Número de bandejas	3 a 5 (se emplean usualmente 5 pero en casos especiales, pueden ser hasta 9 bandejas)
Distancia entre bandejas (cm)	30 a 50
Profundidad de cada bandeja (cm)	20 a 25
Altura máxima permitida de lámina de agua en las bandejas (cm)	10 a 12
Diámetro medio de los orificios (cm)	0.5 a 0.6

PARÁMETRO	VALOR O RANGO
Área media de los orificios o ranuras (cm <sup>3</sup> )	0.2 a 0.3
Separación media entra los orificios del fondo de las bandejas (cm)	2.5
Eficiencia esperada en remoción de CO <sub>2</sub> (%)	30 a 60

**Nota.** Esta tabla muestra los valores o rangos de los parámetros de diseño de las bandejas de aireación para el tratamiento preliminar del agua. Tomado de: W. A. Lozano Rivas. (2015). *Potabilización del agua: principios de diseño, control de procesos y laboratorio: Diseño de unidades preliminares*. (1ª edición), [En línea]. Disponible: <https://search-ebSCOhost-com.ezproxy.uamerica.edu.co/login.aspx?direct=true&db=nlebk&AN=1593375&lang=es&site=eds-live&scope=site>

**Tabla 9.**

*Parámetros de diseño del material de las bandejas*

PARÁMETRO	CARACTERÍSTICAS O RANGO
Material del lecho de contacto	Carbón coque, carbón activado, piedra, ladrillo, triturado, esferas de cerámica, entre otros.
Tamaño del material del lecho de contacto (cm)	4 a 12
Espesor o altura del lecho de contacto en cada bandeja (cm)	15 a 20

**Nota.** Esta tabla muestra las características o rangos de los parámetros de diseño de los materiales de las bandejas de aireación para el tratamiento preliminar del agua. Tomado de: W. A. Lozano Rivas. (2015). *Potabilización del agua: principios de diseño, control de procesos y laboratorio: Diseño de unidades preliminares*. (1ª edición), [En línea]. Disponible: <https://search-ebSCOhost-com.ezproxy.uamerica.edu.co/login.aspx?direct=true&db=nlebk&AN=1593375&lang=es&site=eds-live&scope=site>

6.1.9.f.iii. Cascadas y vertederos. Se deja caer el agua en láminas o capas delgadas sobre uno o más escalones de concreto, lo cual produce una pérdida de energía grande. El aireador se diseña como una escalera y ocurre en las áreas de salpicadura de forma similar a la que ocurre en un río turbulento para la remoción de CO<sub>2</sub>, por lo tanto, entre más grande sea el área horizontal más completa es la aireación mejorando el porcentaje de remoción de CO<sub>2</sub>.

Los criterios de diseño de estos tipos de aireadores se observan en la Tabla 10.

**Tabla 10.**

*Parámetros de diseño para aireadores en cascadas y vertederos*

PARÁMETRO	VALOR O RANGO
Carga hidráulica	300 a 1000 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> *d (0.08 a 0.29 m <sup>2</sup> por cada L/s)
Altura de los escalones o de contrahuella (m)	30 a 40
Altura total del aireador (m)	2 a 5
Profundidad de la huella (m)	0.3 a 0.5
Número de escalones	4 a 10

**Nota.** Esta tabla muestra los valores o rangos de los parámetros de diseño de las cascadas o vertederos para el tratamiento preliminar del agua. Tomado de: W. A. Lozano Rivas. (2015). *Potabilización del agua: principios de diseño, control de procesos y laboratorio: Diseño de unidades preliminares*. (1<sup>a</sup> edición), [En línea]. Disponible: <https://search-ebSCOhost-com.ezproxy.uamerica.edu.co/login.aspx?direct=true&db=nlebk&AN=1593375&lang=es&site=eds-live&scope=site>

6.1.9.g. Desinfección. Consiste en la aplicación principalmente de gas cloro y ozono al agua tratada, tiene por objeto la destrucción de organismos patógenos; no obstante, no implica la destrucción de todos los organismos vivos ni la obtención del agua esterilizada.

Los factores que influyen en el proceso de desinfección son el tipo y concentración de los organismos que deben destruirse, el tipo y concentración del desinfectante, el tiempo de contacto y las características que posee el agua como la turbidez, color, pH y temperatura.

Los desinfectantes más adecuados para utilizar en el proceso son cloro, dióxido de cloro y ozono, por lo cual para seleccionar el mejor entre ellos se debe tener en cuenta la capacidad de destrucción de patógenos, posibilidad de seguimiento preciso, actuación sobre los caracteres organolépticos del agua, que no proporcione mal sabor al agua, facilidad de obtención y uso, precio adecuado y que no sea tóxico o peligroso para la salud a los niveles requeridos. [7]

La efectividad de los desinfectantes implica en el tipo de patógenos que se quieren eliminar, los cuales se exponen en la Tabla 11 los diferentes tipos de organismos y el efecto residual en el sistema de suministro para los tipos de desinfectantes más comunes.

**Tabla 11.**

*Efectividad de los desinfectantes*

AGENTE DESINFECTANTE	EFICACIA COMO BIOCIDA PARA DISTINTOS GRUPOS DE ORGANISMOS			EFECTO RESIDUAL EN EL SISTEMA
	Bacterias	Virus	Quistes de protozoos	
Ácido hipocloroso (HClO)	Excelente	Excelente	Moderada	Bueno
Ión hipoclorito (ClO <sup>-</sup> )	Bueno	Moderado	Sin datos	Bueno
Ozono (O <sub>3</sub> )	Excelente	Excelente	Excelente	Inexistente
Dióxido de Cloro (ClO <sub>2</sub> )	Excelente	Excelente	Sin datos	Bueno

AGENTE DESINFECTANTE	EFICACIA COMO BIOCIDA PARA DISTINTOS GRUPOS DE ORGANISMOS			EFECTO RESIDUAL EN EL SISTEMA
	Bacterias	Virus	Quistes de protozoos	
Cloraminas (NHC <sub>l</sub> <sub>2</sub> y NH <sub>2</sub> Cl)	Moderado	Bajo	Bajo	Excelente

**Nota.** Esta tabla muestra la efectividad que presenta diferentes agentes desinfectantes frente a los microorganismos presentes en los cuerpos de agua. Tomado de: W. A. Lozano Rivas. (2015). *Potabilización del agua: principios de diseño, control de procesos y laboratorio: Desinfección*. (1ª edición), [En línea]. Disponible: <https://search-ebSCOhost-com.ezproxy.uamerica.edu.co/login.aspx?direct=true&db=nlebk&AN=1593375&lang=es&site=eds-live&scope=site>

6.1.9.h. Recarbonatación. Consiste en la aplicación de anhídrido carbónico para reducir el pH del agua, normalmente después del ablandamiento.

#### **6.1.10. Transferencia molecular**

En el proceso de purificación natural del agua. Las bacterias saprofitas degradan la materia orgánica y transforman sustancias complejas en material celular vivo o en sustancias más simples y estables, incluidos los gases de descomposición. [5]

6.1.10.a. Cloración. La cloración se puede lograr mediante la adición de 2 gotas de cloro líquido de uso doméstico sin aroma (5-6%) por cada litro de agua clara y 4 gotas, por cada litro de agua turbia, respectivamente. La mezcla tiene que agitarse bien y debe mantenerse por al menos 30 minutos antes de su uso. Debido a que la luz solar y las temperaturas cálidas hacen que las soluciones de cloro se vuelvan inestables, éstas deben almacenarse en botellas de vidrio de color marrón o verde, o botellas de plástico opaco en un lugar fresco y oscuro. Es el proceso de desinfección más usado en el mundo para la potabilización del agua, debido a que posee un gran poder germicida e interviene en la oxidación de sustancias orgánicas e inorgánicas que comunican sabor y olor al agua. [7]



El cloro se presenta en forma gaseosa ( $\text{Cl}_2$ ), siendo un gas amarillo-verdoso con una concentración del 100% de sustancia activa; como hipoclorito de sodio ( $\text{NaClO}$ ), siendo un líquido transparente amarillo-ámbar con un 13% de sustancia activa y usado para instalaciones de bajo caudal; y como hipoclorito de calcio ( $\text{Ca}(\text{ClO})_2$ ), siendo un sólido granulado con una concentración del 30 al 70% de sustancia activa y usado de la misma forma para instalaciones de bajo caudal luego de preparar la solución. [5]

El mecanismo de acción del cloro radica en su capacidad de oxidación, donde el tiempo mínimo de contacto suele ser de 30 min y mediante la tabla se presenta las concentraciones que se requieren para la destrucción del patógeno E. coli.

**Tabla 12.**

*Capacidad de destrucción de E. coli*

pH	TEMPERATURA (°C)	DESINFECTANTE EMPLEADO	C*T CONCENTRACIÓN (mg/L) * TIEMPO DE CONTACTO (min)
6	5	Ácido hipocloroso	0.04
10	5	Ión hipoclorito	0.92
4.5	15	Dicloramina	5.5
9	15	Monocloramina	64
9	5	Monocloramina	175

**Nota.** Esta tabla muestra la capacidad de destrucción del patógeno de origen fecal E. coli para diferentes agentes desinfectantes. Tomado de: W. A. Lozano Rivas. (2015). *Potabilización del agua: principios de diseño, control de procesos y laboratorio: Desinfección*. (1ª edición), [En línea].

Disponible:

<https://search-ebSCOhost-com.ezproxy.uamerica.edu.co/login.aspx?direct=true&db=nlebk&AN=1593375&lang=es&site=eds-live&scope=site>

6.1.10.b. Estabilización de solutos. Proceso que consiste en la transformación de un soluto objetable en una forma inocua, sin llegar a su remoción.

6.1.10.c. Desalinización. Proceso en el que se remueve el exceso de cloruros en el agua, transformando las aguas salobres en dulces.

## **6.2. Propiedades del agua**

El agua en su estado natural no es pura, debido a que presenta diferentes valores en composición debido a la fuente en la que se encuentra y a los factores externos que alteran dicha composición, lo cual requiere de tratamientos adecuados para su consumo y tener un detallado control sobre las siguientes características fisicoquímicas y microbiológicas.

### **6.1.1 Aspectos fisicoquímicos**

Se abarcan todos los elementos que contienen las fuentes naturales de agua que no han sufrido ninguna transformación o tratamiento que pueden alterar su apariencia, evidenciando rechazo al consumo de esta fuente debido a que dichas sustancias químicas tienen la potencialidad de efectos adversos en la salud del consumidor, generalmente aplicables a tiempos de exposición relativamente largos. [5]

6.2.1.a. Temperatura. Propiedad que estimula el desarrollo de los microorganismos y disminuye la solubilidad de los gases, lo cual es un efecto negativo para los objetivos de la purificación del agua potable, donde se establece un rango de temperatura en el proceso entre los 8 y 15°C. En cualquier caso, una temperatura elevada en el agua le confiere mal sabor y aumenta la corrosión en las tuberías.

6.2.1.b. Turbidez. La turbidez del agua es una propiedad óptica regida por la Ley de Beer que provoca que la luz se disperse y absorba, en lugar de ser transmitida, por lo que la dispersión de la luz que atraviesa un líquido es provocada principalmente por los sólidos suspendidos, lo que permite afirmar que, a mayor turbidez mayor será la luz dispersa. [12]

Dicha propiedad es causada por sustancias y materiales no solubles en suspensión, tales como arcilla, sedimentos, partículas orgánicas coloidales, plancton y microorganismos;

una alta turbiedad protege a los patógenos de la acción del desinfectante y aumenta la demanda del mismo, lo que estimula el crecimiento bacteriano, razón para la cual debe ser removida del agua. [5]

6.2.1.c. Potencial de hidrógeno. El pH permite medir el nivel de acidez de una sustancia, cuando el pH del agua no está entre un rango aceptable puede generar irritación en mucosas y órganos internos entre otros; esta propiedad es utilizada para expresar la concentración de iones hidronio ( $H^+$ ) respecto a la concentración de iones hidroxilo ( $OH^-$ ) y el grado de alcalinidad o acidez de una muestra de agua, no obstante, no se mide en su totalidad.

Adicionalmente, si el agua presenta un pH menor a 7 unidades puede comportarse como corrosiva, y si presenta mayor a 7 unidades puede originar depósitos de calcio que obstruyen las tuberías de la red de distribución.

6.2.1.d. Nitratos y nitritos. Los nitratos son compuestos químicos inorgánicos derivados del nitrógeno, ( $NO_3^-$ ) que se encuentran de manera natural en pequeñas concentraciones en el suelo, los alimentos y las aguas superficiales y subterráneas. [13] Estos compuestos se pueden medir mediante un fotómetro.

El principal efecto perjudicial para la salud derivado de la ingesta de nitratos y nitritos es la metahemoglobinemia, hemoglobina que provoca limitaciones al ser transportada a través de los tejidos. [13]

6.2.1.e. Alcalinidad y dureza. La alcalinidad es una medida de la capacidad del agua para neutralizar ácidos, dada por la presencia de ión hidroxilo ( $OH^-$ ), ión carbonato ( $CO_3^{2-}$ ) e ión bicarbonato ( $HCO_3^-$ ); está asociada a la dureza, siendo la medida de la cantidad de calcio o cal que hay disuelta en el agua, lo que impide la formación de espuma y a altas concentraciones puede generar problemas de tensión en la salud del cuerpo humano y obstrucciones en las cañerías.

La alcalinidad es relevante en el tratamiento del agua ya que reacciona con los coagulantes permitiéndoles actuar durante el proceso de floculación.

La dureza total puede generar problemas en la red de distribución, pues estos compuestos pueden generar disolución de otros compuestos tóxicos en las cañerías, además se evidencia problemas cardiovasculares en comunidades con grandes concentraciones de estos compuestos.

La alcalinidad y dureza se miden por titulación o colorimetría, determinando la cantidad de  $\text{CaCO}_3$  en mg/L que contiene la muestra de agua que se tome.

6.2.1.f. Color. El color en cuerpos de agua es el resultado de la presencia de tanto sustancias suspendidas como disueltas y se denomina color aparente, mientras que al color producto únicamente de sustancias disueltas es llamado color real o verdadero. Esta propiedad es regida por el fenómeno de Tyndall-Faraday y su resultado es una afectación del aspecto estético del agua.

6.2.1.g. Sulfatos. Los sulfatos y otros iones, como el magnesio o los fosfatos, pueden actuar como laxantes cuando se ingieren en cantidades elevadas que superan la capacidad del intestino para absorberlos. [14]

6.2.1.h. Hierro total. La cantidad de hierro en el agua provoca un principal efecto de realizar un cambio de sabor, olor y color desagradable en el agua, y además de la formación de manchas rojas-café en el agua, principalmente, y en los utensilios o artefactos sanitarios que tengan contacto con dicho elemento. Generalmente se eliminan mediante aireación, floculación y filtración, y es medido por titulación o colorimetría.

### **6.1.2 Aspectos microbiológicos**

Se abarcan todos los organismos patógenos como bacterias, virus de origen entérico, protozoos, algas, hongos, larvas y pequeños crustáceos que contiene la fuente de agua, debido al estar en contacto con contaminantes como las heces humanas o excrementos

de animales, los cuales pueden causar un incremento en el color, turbidez, mal sabor y olor, entre otras características que afectan la calidad de la fuente de agua y a la salud del consumidor. [5]

6.2.2.a. *Escherichia coli*. La bacteria *Escherichia Coli* (*E. Coli*) es una bacteria que vive en el intestino humano, pero cuando se ingiere, por ejemplo, por un efluente de un río o lago contaminado puede generar diarrea, cólicos entre otros. Es de origen fecal y no se puede reproducir en el agua excepto si ésta tiene materia orgánica que excede los 14 mg/L de DBO y presenta temperaturas superiores a los 13°C.

6.2.2.b. Coliformes totales. Son microorganismos que tienen presencia en el agua los cuales indican contaminación microbiana lo cual puede generar diarrea y otros problemas intestinales. Este grupo de organismos fermentan la lactosa con producción de ácido y gas entre los 35 y 37°C, y se encuentran normalmente en el suelo y en la vegetación, por lo cual son utilizados como indicadores de la contaminación microbiológica y de la eficiencia de los tratamientos.

### **6.3. Tipo de agua**

#### **6.3.1. *Agua superficial***

Son las aguas que circulan sobre la superficie del suelo, donde se definen como fuentes de agua que están en contacto directo con la atmosfera, como lo son ríos, mares, océanos, quebradas entre otros.

#### **6.3.2. *Agua subterránea***

Es el agua que existe bajo la superficie del terreno, es decir, acuíferos que provienen del subsuelo y para llegar a ellos es necesario pozos, excavar entre otros. El agua subterránea representa más del 30% de las reservas de agua dulce del planeta, sin embargo, hay que tener en cuenta que el agua de las capas de hielo y glaciares no está disponible para uso. [15]

### **6.3.3. Agua potable**

Una vez la calidad fisicoquímica del agua cumple con los parámetros para un consumo humano seguro, establecidos por la normativa de cada país; la cual en Colombia es la Reglamiento Técnico del sector de Agua Potable y Saneamiento Básico RAS 2000, se establece como pura la fuente de agua.

## **6.4. MARCO LEGAL**

### **6.4.1. Constitución Política de Colombia**

Artículo 79. Todas las personas tienen derecho a gozar de un ambiente sano. La ley garantizará la participación de la comunidad en las decisiones que puedan afectarlo. Es deber del Estado proteger la diversidad e integridad del ambiente, conservar las áreas de especial importancia ecológica y fomentar la educación para el logro de estos fines.

### **6.4.2. Ley 99 de 1993**

Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA, y se dictan otras disposiciones. [16]

### **6.4.3. Decreto 1575 del 2007**

El objeto del presente decreto es establecer el sistema para la protección y control de la calidad del agua, con el fin de monitorear, prevenir y controlar los riesgos para la salud humana causados por su consumo, exceptuando el agua envasada. [17]

### **6.4.4. Decreto 1594 de 1984**

Artículo 39. Los criterios de calidad admisibles para la destinación del recurso para consumo humano y doméstico son los que se relacionan a continuación, e indican que para su potabilización se requiere solo desinfección: [18]

**Tabla 13.***Criterios De Calidad Admisibles*

REFERENCIA	EXPRESADO COMO	VALOR
Amoniaco	N	1.0
Arsénico	As	0.05
Bario	Ba	1.0
Cadmio	Cd	0.01
Cianuro	CN <sup>-</sup>	0.2
Cinc	Zn	15.0
Cloruros	Cl <sup>-</sup>	250.0
Cobre	Cu	1.0
Color	Color Real	20 unidades, escala Platino – Cobalto
Compuestos Fenólicos	Fenol	0.002
Cromo	Cr <sup>+6</sup>	0.05
Difenil Policlorados	Concentración de agente activo	No detectable
Mercurio	Hg	0.002
Nitratos	N	10.0
Nitritos	N	1.0
pH	Unidades	6.5 – 8.5
Plata	Ag	0.05
Plomo	Pb	0.05
Selenio	Se	0.01
Sulfatos	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	400.0
Tensoactivos	Sustancias activas al azul de metileno	0.5
Turbiedad	UJT	10
Conformes totales	nMP	1.000 microorganismos/100 mL

**Nota.** Esta tabla muestra los valores permisibles para los parámetros fisicoquímicos que se presentan en las fuentes de agua. Tomado de: Ministerio de agricultura, “Decreto 1594 de 1984,” *Ley 9 1979 - Ley 2811 1974*, vol. 1984, no. Junio 26, p. 55, 1984, [En línea]. Disponible: [http://www.fedepanela.org.co/files/DECRETO\\_1594\\_DE\\_1984.pdf](http://www.fedepanela.org.co/files/DECRETO_1594_DE_1984.pdf).

#### **6.4.5. Decreto 3930 de 2010**

Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9ª de 1979, así como el Capítulo II del Título VI -Parte III- Libro II del Decreto-ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos y se dictan otras disposiciones. [19]

**Artículo 10.** Uso para consumo humano y doméstico. Se entiende por uso del agua para consumo humano y doméstico su utilización en actividades tales como:

- Bebida directa y preparación de alimentos para consumo inmediato.
- Satisfacción de necesidades domésticas, individuales o colectivas, tales como higiene personal y limpieza de elementos, materiales o utensilios.
- Preparación de alimentos en general y en especial los destinados a su comercialización o distribución, que no requieran elaboración.

#### **6.4.6. Decreto 1541 de 1978**

Por el cual se reglamenta la Parte III del Libro II del Decreto - Ley 2811 de 1974: "De las aguas no marítimas" y parcialmente la Ley 23 de 1973.

**Artículo 54.** Las personas naturales o jurídicas y las entidades gubernamentales que deseen aprovechar aguas para usos diferentes de aquellos que se ejercen por ministerio de la ley requieren concesión, para lo cual deberán dirigir una solicitud al Instituto Nacional de los Recursos Naturales Renovables y del Ambiente –INDERENA. [20]

#### **6.4.7. Resolución 2115 del 2007**

Por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano. [2]

**ARTÍCULO 2º. - CARACTERÍSTICAS FÍSICAS.** El agua para consumo humano no podrá sobrepasar los valores máximos aceptables para cada una de las características físicas que se señalan a continuación:



**Tabla 14.**

*Características Físicas*

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS	EXPRESADAS COMO	VALOR MÁXIMO ACEPTABLE
Color aparente	Unidades de Platino Cobalto (UPC)	15
Olor y sabor	Aceptable o no aceptable	Aceptable
Turbiedad	Unidades Nefelométricas de Turbiedad (UNT)	2

**Nota.** Esta tabla muestra los valores máximos aceptables de las características físicas del agua para consumo humano. Tomado de: Ministerio de la Protección Social and Ministerio de Medio Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, “Resolución Número 2115 de 2007”. *Minist. la Protección Soc. Minist. Ambient. Vivienda y Desarro. Territ.*, p. 23, 2007, [En línea]. Disponible: [http://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/normativa/Res\\_2115\\_de\\_2007.pdf](http://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/normativa/Res_2115_de_2007.pdf)

**ARTÍCULO 4°. - POTENCIAL DE HIDRÓGENO.** El valor para el potencial de hidrógeno pH del agua para consumo humano, deberá estar comprendido entre 6,5 y 9,0.

**ARTÍCULO 6°. - CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DE SUSTANCIAS QUE TIENEN IMPLICACIONES SOBRE LA SALUD HUMANA.** Las características químicas del agua para consumo humano en relación con los elementos, compuestos químicos y mezclas de compuestos químicos que tienen implicaciones sobre la salud humana se señalan en el siguiente cuadro:

**Tabla 15.**

*Características Químicas que tienen implicaciones sobre salud humana*

<b>ELEMENTOS, COMPUESTOS QUÍMICOS Y MEZCLAS DE COMPUESTOS QUÍMICOS QUE TIENEN IMPLICACIONES SOBRE LA SALUD HUMANA</b>	<b>EXPRESADOS COMO</b>	<b>VALOR MÁXIMO ACEPTABLE (MG/L)</b>
Carbono Orgánico Total	COT	5.0
Nitritos	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	0.1
Nitratos	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	10
Fluoruros	F <sup>-</sup>	1.0

**Nota.** Esta tabla muestra los valores máximos aceptables de las características químicas del agua para consumo humano. Tomado de: Ministerio de la Protección Social and Ministerio de Medio Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, “Resolución Número 2115 de 2007”. *Minist. la Protección Soc. Minist. Ambient. Vivienda y Desarro. Territ.*, p. 23, 2007, [En línea]. Disponible: [http://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/normativa/Res\\_2115\\_de\\_2007.pdf](http://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/normativa/Res_2115_de_2007.pdf)

**ARTÍCULO 7º.- CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS QUE TIENEN CONSECUENCIAS ECONÓMICAS E INDIRECTAS SOBRE LA SALUD HUMANA.** Las características químicas del agua para consumo humano en relación con los elementos y compuestos químicos que tienen consecuencias económicas e indirectas sobre la salud se señalan a continuación:

**Tabla 16.**

*Características Químicas que tienen mayores consecuencias económicas e indirectas sobre la salud humana*

<b>ELEMENTOS Y COMPUESTOS QUÍMICOS QUE TIENEN IMPLICACIONES DE TIPO ECONÓMICO</b>	<b>EXPRESADAS COMO</b>	<b>VALOR MÁXIMO ACEPTABLE (mg/L)</b>
Calcio	Ca	60
Alcalinidad Total	CaCO <sub>3</sub>	200
Cloruros	Cl <sup>-</sup>	250
Aluminio	Al <sup>3+</sup>	0.2
Dureza Total	CaCO <sub>3</sub>	300
Hierro Total	Fe	0.3
Magnesio	Mg	36
Manganeso	Mn	0.1
Molibdeno	Mo	0.07
Sulfatos	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	250
Zinc	Zn	3
Fosfatos	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	0.5

**Nota.** Esta tabla muestra los valores máximos aceptables de las características químicas frente a las mayores consecuencias económicas e indirectas sobre el consumo humano. Tomado de: Ministerio de la Protección Social and Ministerio de Medio Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, “Resolución Número 2115 de 2007”. *Minist. la Protección Soc. Minist. Ambient. Vivienda y Desarro. Territ.*, p. 23, 2007, [En línea]. Disponible:

[http://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/normativa/Res\\_2115\\_de\\_2007.pdf](http://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/normativa/Res_2115_de_2007.pdf).

**ARTÍCULO 9º.- CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DE OTRAS SUSTANCIAS UTILIZADAS EN LA POTABILIZACIÓN.** Además de lo señalado en los artículos 5º, 6º, 7º y 8º de la presente Resolución, dentro las características químicas del agua para consumo humano se deberán tener en cuenta los siguientes valores aceptables para otras sustancias químicas utilizadas en el tratamiento del agua, así:

El valor máximo aceptable del residual de aluminio derivado de su uso como coagulante en el tratamiento de agua para consumo humano en su forma ( $Al^{3+}$ ) será de 0,2 mg/L. Si se utiliza otro coagulante basado en sales de hierro, el valor máximo aceptable para el residual será 0,3 mg/L. En el caso de utilizar otras sustancias químicas en el tratamiento del agua para consumo humano, el valor aceptable para el residual correspondiente u otras consideraciones al respecto, serán reconocidas por las Guías de la Calidad de Agua vigentes de la Organización Mundial de la Salud y adoptadas por el Ministerio de la Protección Social. [15]

El valor aceptable del cloro residual libre en cualquier punto de la red de distribución del agua para consumo humano deberá estar comprendido entre 0,3 y 2,0 mg/L. La dosis de cloro por aplicar para la desinfección del agua y asegurar el residual libre debe resultar de pruebas frecuentes de demanda de cloro. Cuando se utilice un desinfectante diferente al cloro o cualquiera de las formulaciones o sustancias que utilicen compuestos distintos para desinfectar el agua para consumo humano, los valores aceptables para el residual correspondiente u otras consideraciones al respecto, serán los reconocidos por la Organización Mundial de la Salud y adoptados por el Ministerio de la Protección Social, quien tendrá en cuenta el respectivo concepto toxicológico del producto para expedir el concepto técnico. [15]

Las plantas de tratamiento deben garantizar mediante sistemas, estructuras o procedimientos de control, el tiempo de contacto del cloro como desinfectante, antes de enviar el agua a las redes y de poner el alcalinizante, el cual debe ser establecido de acuerdo con las tablas del artículo 115 de la Resolución 1096 de 2000 del entonces Ministerio de Desarrollo Económico, o la norma que la sustituya, modifique o adicione.

La cal, el sulfato de aluminio, el cloro y el hipoclorito utilizados en el tratamiento o potabilización del agua para el consumo humano, deben cumplir con la calidad determinada por la Resolución N°. 2314 de 1986 del Ministerio de Salud hoy de la Protección Social o la norma que la sustituya, modifique o adicione y con lo previsto en el capítulo C.4 – Coagulación – Mezcla rápida - de que trata el Título C del Reglamento de Agua y Saneamiento del año 2000, expedido por el entonces Ministerio de Desarrollo Económico o el que lo sustituya, modifique o adicione. Para otros productos, materiales (polímeros) o insumos que vayan a ser utilizados en la potabilización del agua para consumo humano, el Ministerio de la Protección Social emitirá el respectivo concepto técnico, el cual incluye el concepto toxicológico. [15]

#### **6.4.8. Resolución N°1096 del 17 de noviembre de 2000 (RAS 2000)**

Señala los requisitos que deben cumplir las obras, equipos y procedimientos operativos que se utilicen en la prestación de los servicios públicos domiciliarios de acueducto, alcantarillado y aseo y sus actividades complementarias.

**Título A. Aspectos generales de los sistemas de agua potable y saneamiento básico.** El presente Reglamento tiene por objeto señalar los requisitos técnicos que deben cumplir los diseños, las obras y procedimientos correspondientes al Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico y sus actividades complementarias, señaladas en el artículo 14, numerales 14.19, 14.22, 14.23 y 14.24 de la Ley 142 de 1994, que adelanten las entidades prestadoras de los servicios públicos municipales de acueducto, alcantarillado y aseo o quien haga sus veces. [1]

**Título C. Aspectos generales de los sistemas de agua potable y saneamiento básico.** Establece las condiciones requeridas para la concepción y el desarrollo de sistemas de potabilización del agua. Así mismo orienta la planificación, el diseño, la construcción, la supervisión técnica, la operación, el mantenimiento y el seguimiento de la operación de estos sistemas y sus componentes. [21]

## 7. DIAGNOSTICO

### 7.1. Pretratamiento

La fuente de agua al proviene de una quebrada lo cual la clasifica como agua superficial, Además se tomará por cumplido una filtración en el sistema de captación de agua cruda para evitar el ingreso de solidos de gran tamaño como ramas, piedras u otros elementos que puedan llegar obstruir los equipos del sistema de potabilización.

### 7.2. Análisis del agua cruda

Teniendo en cuenta los parámetros fisicoquímicos importantes con los que debe cumplir el agua potable, con el apoyo de la Universidad de Pereira se hace un estudio fisicoquímico de la quebrada Cicuedo fuente principal de agua para la comunidad (

ANEXOS), obteniendo los siguientes resultados, donde para los parámetros de agua aún desconocidos se toman como 0.

En consecuente, se calcula el índice de riesgo de la calidad del agua para consumo con la siguiente ecuación.

**Ecuación 1. Cálculo del índice IRCA según la resolución 2115 de 2007**

$$IRCA\% = \frac{\sum \text{Valor parámetros incumplidos}}{\text{Total puntaje de riesgo}}$$

**Tabla 17.**

*Análisis de la muestra de agua*

PARÁMETRO	VALOR MÁX. RESOLUCIÓN 2115	RESULTADO	UNIDADES	CUMPLIMIENTO	IRCA
Color aparente	15	10	UPC	Si	0
Olor y sabor	Aceptable	ND		Si	0
Turbiedad	2	2,8	UNT	No	15
Antimonio	0,02	ND	mg/L	Si	0
Arsénico	0,01	ND	mg/L	Si	0
Bario	0,7	ND	mg/L	Si	0
Cadmio	0,003	ND	mg/L	Si	0
Cianuro libre y disociable	0,05	ND	mg/L	Si	0
Cobre	1	ND	mg/L	Si	0
Cromo total	0,05	ND	mg/L	Si	0
Mercurio	0,001	ND	mg/L	Si	0
Níquel	0,02	ND	mg/L	Si	0
Plomo	0,01	ND	mg/L	Si	0
Selenio	0,01	ND	mg/L	Si	0
Trihalometanos totales	0,2	ND	mg/L	Si	0
Hidrocarburos aromáticos policíclicos	0,01	ND	mg/L	Si	0
Carbono orgánico total (COT)(mg/L)	5	ND	mg/L	Si	0
Nitritos	0,1	0,01	mg/L	Si	0

PARÁMETRO	VALOR MÁX. RESOLUCIÓN 2115	RESULTADO	UNIDADES	CUMPLIMIENTO	IRCA
Nitratos	10	1,11	mg/L	Si	0
Fluoruros	1	ND	mg/L	Si	0
Calcio	60	ND	mg/L	Si	0
Alcalinidad total	200	70	mg/L	Si	0
Cloruros	250	ND	mg/L	Si	0
Aluminio	0,2	ND	mg/L	Si	0
Dureza total	300	72	mg/L	Si	0
Hierro total	0,3	0,15	mg/L	Si	0
Magnesio	36	ND	mg/L	Si	0
Manganeso	0,1	ND	mg/L	Si	0
Molibdeno	0,07	ND	mg/L	Si	0
Sulfatos	250	5	mg/L	Si	0
Zinc	3	ND	mg/L	Si	0
Fosfatos	0,5	ND	mg/L	Si	0
Aluminio residual	0,2	ND	mg/L	Si	0
Sales residuales de hierro	0,3	ND	mg/L	Si	0
Cloro residual libre	2	ND	mg/L	Si	0
Escherichia E. Coli	0	70	UFC/100 cm <sup>3</sup>	No	25
Coliformes totales	0	23000	UFC/100 cm <sup>3</sup>	No	15
pH	6.5-9.0	8,06		Si	0
<b>Total (%)</b>					<b>55</b>

**Nota.** Esta tabla muestra las propiedades fisicoquímicas tomadas para la fuente de agua cruda.

Se obtiene un índice de riesgo de 55% clasificando como un agua de alto riesgo, puesto que los parámetros de turbiedad, coliformes totales y Escherichia coli no cumplen con los parámetros establecidos la resolución 2115 de 2007. [2]



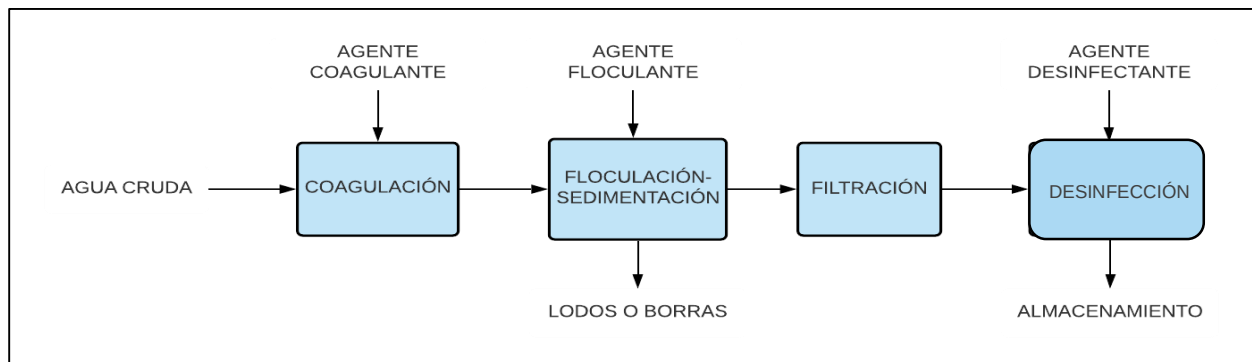
### 7.3. Diagrama de proceso

De acuerdo a los parámetros establecidos en la Tabla 17, se plantea el diagrama de bloques del proceso de potabilización del agua para la quebrada Cicuedo. Estos procesos se proponen bajo las siguientes premisas:

- Un pretratamiento de cribado, en la etapa de captación, donde se retire sólidos de gran tamaño como hojas, ramas, piedras entre otros, que puedan afectar el funcionamiento de otros equipos más adelante.
- Debido a que la turbiedad es bastante baja (2.8 NTU), y tampoco se sabe si está aumenta o disminuye a lo largo de año, con el objetivo de asegurar la calidad del agua se conservan las etapas de Coagulación, Floculación y Sedimentación. Sin embargo, es necesario comprobar a nivel laboratorio si con las unidades de filtración y desinfección se puede lograr cumplir con los parámetros establecidos por la normatividad.

**Figura 12.**

*Esquema del proceso de potabilización*



**Nota.** Esta figura representa el esquema del proceso para el sistema de tratamiento de agua potable.

## 7.4. Determinación del caudal

### 7.4.1. Cálculo de la población futura

Teniendo en cuenta los datos del censo de población del resguardo indígena ubicado en Santa Cecilia (Pueblo Rico), donde se tomaron los datos para el 2005, 2018 y 2020 para determinar la razón de crecimiento de la población por medio de la fórmula que propone el método geométrico, [17] los datos obtenidos del DANE son:

**Tabla 18.**

*Proyección de la población*

AÑO	POBLACIÓN (HABITANTES)
2005	1291
2018	1440
2020	1484

**Nota.** Esta tabla muestra la proyección de la población del resguardo Embera Kito Gitó Dokabú. Datos tomados de: DANE, “Grupos étnicos información técnica”, (2018). <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/grupos-etnicos/informacion-tecnica>

**Ecuación 2.** *Cálculo tasa de crecimiento de la población*

$$r = \left( \frac{P_{i+1}}{P_i} \right)^{\frac{1}{t_{i+1}-t_i}} - 1$$

Donde

$r$  = tasa de crecimiento de la población

$P_{i+1}$  = población del año siguiente (hab)

$P_i$  = población en ese año (hab)

$t_{i+1}$  = año siguiente

$t_i$  = año

Se determina la tasa de crecimiento poblacional para cada par de años.

$$r = \left( \frac{1440}{1291} \right)^{\frac{1}{2018-2005}} - 1 = 0.0084$$

$$r = \left( \frac{1484}{1440} \right)^{\frac{1}{2020-2018}} - 1 = 0.0152$$

El promedio de las razones de crecimiento poblacional es de 1.18%. Con dicho valor se toma para el cálculo de la población futura frente a un periodo de diseño de 25 años mediante la ecuación 3.

### **Ecuación 3. Cálculo población futura**

$$P_f = P_i \cdot (1 + r)^t$$

Donde

$P_f$  = población futura (hab)

$P_i$  = población actual (hab)

$r$  = tasa de crecimiento de la población

$t$  = tiempo entre los periodos (años)

$$P_f = 1484 \cdot (1 + 0.0118)^{25} = 1990 \text{ hab}$$

#### **7.4.2. Dotación neta máxima**

La dotación neta máxima ( $D_{\text{neta}}$ ) se refiere a la cantidad de agua potable requerida por un habitante para satisfacer necesidades básicas en un periodo de tiempo de un día.

Con respecto al resguardo Gitó Dokabú se establece la dotación neta máxima según el número de habitantes en la zona, dando un valor de 110 L/hab\*día. [1]

**Tabla 19.**

*Dotación neta por habitante y por día según número de habitantes servidos*

NÚMERO DE HABITANTES ABASTECIDOS	DOTACIÓN NETA MÁXIMA (L/HAB*DÍA)
<2500	110
2500-12000	135
12000	145
>75000	155

**Nota.** Esta tabla muestra la dotación neta máxima establecida para el número de habitantes abastecidos. Tomado de: Título A. RAS, “RAS 2000, Titulo A - Aspectos generales de los sistemas de agua potable y saneamiento básico. Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio Colombia”. [En línea]. Disponible:

<https://www.minvivienda.gov.co/viceministerio-de-agua-y-saneamiento-basico/reglamento-tecnico-sector/manuales>

#### **7.4.3. Dotación bruta**

La dotación bruta establece la dotación neta incluyendo las pérdidas que pueden presentarse en el sistema de abastecimiento, el cual corresponden a la diferencia entre el volumen de agua tratada y medida a la salida de las plantas potabilizadoras y el volumen de agua entregado a la población. Para este proyecto que compete un diseño de un nuevo sistema, lo que establece un porcentaje de pérdidas máximas admisibles

de 25% según lo propuesto por el RAS 2000, título C, con el fin de manejar un factor de seguridad. [21]

**Ecuación 4. Cálculo De La Dotación Bruta**

$$D_{bruta} = \frac{D_{neta}}{\left(1 - \frac{\%p}{100}\right)}$$

Donde

$D_{bruta}$  = Dotación bruta (L/hab\*día)

$D_{neta}$  = Dotación neta máxima (L/hab\*día)

$\%p$  = Pérdidas máximas admisibles

$$D_{bruta} = \frac{110 \frac{L}{hab \cdot día}}{(1 - 0.25)} = 146.67 \frac{L}{hab \cdot día}$$

**7.4.4. Caudal medio diario ( $Q_{md}$ )**

Presenta el consumo promedio diario calculado para la población proyectada al final del periodo de diseño, mediante la dotación bruta que se requiere para la población de estudio. [21]

**Ecuación 5. Cálculo del caudal medio diario**

$$Q_{md} = \frac{P \cdot D_{bruta}}{86400}$$

Donde

$Q_{md}$  = Caudal medio diario (L/s)

$P$  = Población de diseño (hab)

$$Q_{md} = \frac{1990 \text{ hab} \cdot 146.67 \frac{L}{hab \cdot día}}{86400} = 3.38 \frac{L}{s}$$

#### **7.4.5. Caudal máximo diario ( $Q_{MD}$ )**

Representa el máximo que se registra en 24 horas durante cualquier año, que requiere del caudal medio diario calculado anteriormente y el coeficiente de consumo máximo diario, tomando un valor de 1.4 debido a que la población de estudio es pequeña (<12500 hab). [5], [21]

#### **Ecuación 6. Cálculo del caudal máximo diario**

$$Q_{MD} = K_1 \cdot Q_{md}$$

Donde

$Q_{MD}$  = Caudal máximo diario (L/s)

$K_1$  = Coeficiente de consumo máximo diario

$$Q_{MD} = 1.4 \cdot 3.38 \text{ L/s} = 4.73 \text{ L/s}$$

#### **7.4.6. Caudal máximo horario ( $Q_{MH}$ )**

Explica el consumo máximo que se registra durante 1 hora en cualquier año, ignorando el caudal de incendios mediante el caudal máximo diario observado anteriormente y el coeficiente de consumo máximo horario, con un valor de 1.8 debido al poco tamaño de la población de estudio. [5], [21]

#### **Ecuación 7. Cálculo del caudal máximo horario**

$$Q_{MH} = K_2 \cdot Q_{MD}$$

Donde

$Q_{MH}$  = Caudal máximo horario (L/s)

$K_2$  = Coeficiente de consumo máximo horario

$$Q_{MH} = 1.8 \cdot 4.73 \text{ L/s} = 8.51 \text{ L/s}$$

Debido a que Santa Cecilia (Pueblo Rico, Risaralda) es un lugar que no dispone de energía eléctrica para que pueda operar el sistema de potabilización, teniendo en cuenta que los requerimientos de agua por parte de la población son pequeños frente a los cálculos anteriormente presentados, se establece un tiempo de operación de 8 h y no 24 h por cuestión de costos que pueda llevar a cabo la implementación del diseño presentado, lo cual con lleva un ajuste a los caudales para dicho tiempo de la siguiente manera:

**Ecuación 8. Ajuste de caudales**

$$Q_{md}^{nuevo} = Q_{md} \cdot \frac{24 h}{8 h}$$

Donde

$Q_{md}^{nuevo}$  = Caudal medio diario ajustado (L/s)

Con base a la ecuación se calculan los nuevos valores de caudales  $Q_{md}$ ,  $Q_{MD}$  y  $Q_{MH}$  representado en la tabla 20.

**Tabla 20.**  
*Caudales de diseño ajustados*

CAUDAL	VALOR AJUSTADO PARA 8h (L/s)
$Q_{md}$	10.13
$Q_{MD}$	14.19
$Q_{MH}$	25.54

**Nota.** Esta tabla muestra los caudales ajustados para una operación de 8h para el sistema de tratamiento.

## 8. MATRIZ DE SELECCIÓN DE PROCESOS

Mediante una matriz de priorización se comparan diferentes alternativas tecnológicas con sus ventajas y desventajas de acuerdo al contexto, permitiendo escoger de manera cuantitativa la alternativa más apropiada para cada proceso y escenario. [22]

La Tabla 21 muestra los parámetros y su porcentaje de importancia correspondiente para seleccionar los equipos necesarios para el sistema de tratamiento de agua que requiere el resguardo.

El cálculo de la calificación general (CG) se usa mediante la ecuación 9. [22]

**Ecuación 9.** *Cálculo calificación general para cada unidad*

$$CG = \sum C_i \cdot p$$

Donde

$C_i$  = Calificación por criterio

$p$  = porcentaje por criterio

CG = Calificación general de la alternativa

Teniendo en cuenta los parámetros que no cumplen con la normativa se empieza a analizar los sistemas de potabilización dentro de una matriz de selección teniendo en cuenta los siguientes criterios de selección con sus respectivos porcentajes de importancia.



**Tabla 21.***Criterios y porcentajes de importancia sistemas de tratamiento*

CRITERIO	PORCENTAJE DE IMPORTANCIA
Remoción de contaminante	35%
Costos	30%
Complejidad de operación	25%
Área requerida	10%

**Nota.** Esta tabla muestra los porcentajes de importancia establecidos para cada criterio.

El porcentaje de importancia asignado se basa en la situación actual y futura del resguardo en estudio, así como la instalación y operación de la planta. Por lo cual al momento de calificar cada alternativa se compara su desempeño con la descripción de cada criterio.

**Tabla 22.***Descripción de criterios para el sistema de potabilización*

CRITERIO	DESCRIPCIÓN
Remoción de contaminantes	Es la eficiencia del sistema para remover los componentes de riesgo para el consumo humano, o la capacidad de tratar el agua hasta que cumpla con los parámetros de seguridad establecidos en la normatividad. Siendo este el objetivo principal del proyecto tiene un mayor peso.
Costos	Son los costos asociados a la inversión inicial de los equipos, al igual que costos de operación como lo son electricidad, insumos y mano de obra para el correcto funcionamiento.
Complejidad de operación	Uno de los factores más importantes en esta situación es la necesidad de que la comunidad pueda operar la planta después de

CRITERIO	DESCRIPCIÓN
	una capacitación puesto que la contratación de un personal más certificado podría llegar a ser muy costoso.
Área requerida	A pesar de que el área es un factor importante no es crucial ya que cuentan con una zona importante disponible.

**Nota.** Esta tabla muestra la descripción de cada uno de los criterios establecidos para el sistema de potabilización.

Se dará una calificación de acuerdo al desempeño de la alternativa respecto al criterio del 1 - 5 siendo 5 un desempeño excelente y 1 un desempeño no aceptable, siendo cada calificación acorde para cada criterio.

**Tabla 23.**

*Calificación de niveles de desempeño*

NIVEL DE DESEMPEÑO	CALIFICACIÓN
Excelente	5
Muy bueno	4
Bueno	3
Aceptable	2
No aceptable	1

**Nota.** Esta tabla muestra el nivel de desempeño a utilizar como calificación cuantitativa para la matriz de selección.

### 8.1. Coagulación (mezcla rápida)

La unidad de tratamiento que realiza la mezcla rápida tiene como objetivo reducir los niveles de turbiedad desde los 2.8 NTU hasta un mínimo de 2.0 NTU, que establece la norma, el cual cumple la función de dispersar el agente coagulante al agua, de tal forma de crear una mezcla homogénea y cuenta con una concentración uniforme a lo largo de

toda la unidad. Las tecnologías que son técnicamente viables y permiten el buen funcionamiento del proceso son A: Tanque homogeneizador, B: Resalto hidráulico, C: Vertedero rectangular, D: Vertedero Triangular, E: Canaleta Parshall, el cual se selecciona mediante los criterios establecidos en la Tabla 24, donde ciertos criterios se le asignaron valores inversos con respecto a la búsqueda del sistema más adecuado, de acuerdo a la Tabla 23. Asignándole un valor de 1 como mayor complejidad de operación y un valor de 5 como menor complejidad de operación, de igual manera para el criterio de costos.

**Tabla 24.**

*Matriz de selección unidad de coagulación.*

CRITERIO	A		B		C	
	C <sub>i</sub>	Resultado	C <sub>i</sub>	Resultado	C <sub>i</sub>	Resultado
Eficacia del mezclado	5	1.75	4	1.4	4	1.4
Costos	4	1.2	4	1.2	4	1.2
Complejidad de operación	1	0.25	4	1	4	1
Área requerida	4	0.4	3	0.3	3	0.3
Total	3.6		3.9		3.9	

**Nota.** Esta tabla muestra la matriz de selección para las unidades de tanque homogeneizador (A), resalto hidráulico (B) y vertedero rectangular (C), para el proceso de coagulación del sistema de potabilización.

**Tabla 25.***Matriz de selección unidad de coagulación. (Continuación)*

CRITERIO	D		E	
	C <sub>i</sub>	Resultado	C <sub>i</sub>	Resultado
Eficacia del mezclado	4	1.4	1	0.35
Costos	4	1.2	4	1.2
Complejidad de operación	5	1.25	2	0.5
Área requerida	3	0.3	5	0.5
Total	4.15		2.55	

**Nota.** Esta tabla muestra la matriz de selección para las unidades de vertedero triangular (D) y dispersores (E) para el proceso de coagulación del sistema de potabilización.

A partir de la matriz de selección y los valores obtenidos de la misma, se opta por el uso de un vertedero triangular, donde se especifica la selección esta unidad en la Tabla 26.

**Tabla 26.***Justificación del vertedero triangular.*

CRITERIO	JUSTIFICACIÓN
Eficacia del mezclado	El vertedero triangular trabaja de manera óptima para caudales bajos tal como el calculado anteriormente, generando un mezclado optimo con el agente coagulante, sin embargo, este mezclado no es tan efectivo como el mecánico. [5], [7], [9], [10]
Costos	Es una tecnología de baja inversión inicial, la cual tampoco necesita muchos recursos para su operación ni su mantenimiento puesto que es meramente hidráulica y su operación aprovechando la gravedad. [5], [9]

CRITERIO	JUSTIFICACIÓN
Complejidad de operación	Es un sistema duradero sencillo de operar fácil de mantener puesto que no requiere el cambio de piezas muy a menudo, ni elementos complejos de usar. [5], [7], [9]
Área requerida	Para usar esta tecnología es necesario disponer de un área que permita la correcta mezcla de coagulante, lo cual el vertedero triangular permite obtener ésta área necesaria debido al amplio canal para el agua y su posterior aplicación del coagulante. [5], [7], [9]

**Nota.** Esta tabla muestra la justificación del vertedero triangular seleccionado como unidad para el proceso de coagulación.

## 8.2. Coagulante

Para llevar a cabo el proceso de coagulación anteriormente mencionado es necesario un agente coagulante, en el mercado existen diferentes sustancias que permiten llevar a cabo este proceso, para escoger el coagulante más adecuado se proponen los siguientes criterios.

**Tabla 27.**

*Descripción criterios de selección del coagulante*

CRITERIO	DESCRIPCIÓN
Formación de coágulos	Es la capacidad de generar el fenómeno de la coagulación de una forma efectiva para que así se puedan remover los compuestos contaminantes del agua, teniendo en cuenta la temperatura, alcalinidad y otros factores que influyen en este proceso. Calificando, así como 5 al que logre una buena formación de coágulos en las condiciones y 1 el que no logre formar coágulos.
Costos	Hace referencia a los costos de la materia prima puesto que este será un costo fijo en el tiempo de operación del sistema, donde el de menor costo tendrá una calificación de 5 y el más costoso de 1.

CRITERIO	DESCRIPCIÓN
Disponibilidad en el mercado	La facilidad de conseguir las materias primas, puesto que en caso de que esta se vuelva escasa, o no se pueda conseguir fácilmente, no permitirá la correcta operación del sistema. Por lo cual se establece como 5 la materia con mayor disponibilidad y 1 la más difícil de conseguir.
Corrosividad	La naturaleza de una sustancia corrosiva puede afectar el sistema de cañerías y de equipos por lo cual se deben evitar de ser posible. Por lo cual se califica con 5 a la que no es corrosiva y con 1 a la que es muy corrosiva.
Transporte	La naturaleza de la sustancia repercute en la facilidad de transporte, por lo cual teniendo en cuenta que es una zona de difícil acceso y por consecuente aumenta los precios en caso de que no sea fácil el transporte. Siendo 5 la que tenga un menor peso y estado de la materia sea lo más compacto y fácil de manipular, mientras que uno será el que requiera más tecnología para su transporte y manipulación son los gases.

**Nota.** Esta tabla muestra la descripción de cada criterio para la selección del agente coagulante.

De acuerdo a cada criterio establecido para el tipo de coagulante que se requiere para el proceso de coagulación, se establecen mediante la Tabla 28 los porcentajes de importancia frente al funcionamiento que tiene los diferentes coagulantes utilizados en sistemas de tratamiento de agua potable y al contexto de la comunidad que presentan en su uso adecuado de los mismos.

**Tabla 28.**

*Porcentajes de importancia para la selección del coagulante*

CRITERIO	PORCENTAJE DE IMPORTANCIA
Formación de coágulos	35%
Costos	30%
Disponibilidad en el mercado	10%
Corrosividad	10%
Transporte	15%

**Nota.** Esta tabla muestra los porcentajes de importancia establecidos para cada criterio de selección.

En la actualidad hay diferentes tipos de coagulantes, tanto sintéticos como orgánicos; para este caso se evaluarán los siguientes coagulantes Sulfato de aluminio ( $\text{Al}_2(\text{SO}_3)_3$ ), Sulfato de hierro ( $\text{Fe}_2(\text{SO}_3)_3$ ), Cloruro férrico ( $\text{FeCl}_3$ ).

**Tabla 29.***Matriz de selección del coagulante*

CRITERIO	SULFATO DE ALUMINIO		SULFATO DE HIERRO		CLORURO FÉRRICO	
	C <sub>i</sub>	Resultado	C <sub>i</sub>	Resultado	C <sub>i</sub>	Resultado
Formación coágulos	5	1,75	4	1,4	4	1,4
Costos	5	1,5	4	1,2	4	1,2
Disponibilidad en el mercado	5	0,5	5	0,5	4	0,4
Corrosividad	3	0,3	3	0,3	1	0,1
Transporte	5	0,75	5	0,75	5	0,75
		4,8		4.15		3,85

**Nota.** Esta tabla muestra la matriz de selección, comparando los tres coagulantes utilizados para el proceso de coagulación.

A través de la anterior matriz se escoge el sulfato de aluminio puesto que cumple con los requisitos expuestos en la Tabla 30.

**Tabla 30.***Justificación del sulfato de aluminio como coagulante*

CRITERIO	JUSTIFICACIÓN
Formación de coágulos	El sulfato de aluminio tiene un gran rango de operación respecto al pH donde la muestra de agua tiene un valor de 8 el aluminio puede generar los flóculos y no disminuirá de una forma drástica el pH del agua. [10], [23], [24]
Costos	Debido a su alta producción e implementación a nivel mundial es uno de los coagulantes más económicos del mercado. [15], [23], [24]



CRITERIO	JUSTIFICACIÓN
Disponibilidad en el mercado	Además de económico también tiene una gran disponibilidad permitiendo un abastecimiento sencillo a lo largo del año. [15], [23], [24]
Corrosividad	Al ser un compuesto que genera iones este tiende a generar problemas de corrosión, pero no tan severos como los del cloruro férrico. [23], [24], [25]
Transporte	La presentación principal de este compuesto a condiciones ambiente es en escamas por lo cual su transporte es fácil y económico en comparación si fuera líquido. [10], [23], [24]

**Nota.** Esta tabla muestra la justificación del sulfato de aluminio seleccionado como coagulante para el proceso de coagulación.

### 8.3. Floculación (mezcla lenta)

Teniendo en cuenta que uno de los parámetros de riesgo del análisis fisicoquímico es la turbiedad, es necesario sedimentar los coágulos formados en la etapa anterior, sin embargo, estos aún no tienen la densidad suficiente para que este fenómeno de precipitación suceda, por lo cual es necesario un agente floculante que permita que los coágulos se unan y empiecen a precipitarse facilitando la separación de los compuestos contaminante en la unidad de precipitación.

Con el objetivo de escoger la unidad de floculación que mejor desempeño tenga, se tienen en cuenta los siguientes criterios descritos en la Tabla 31.

**Tabla 31.**

*Descripción de los criterios para la floculación*

CRITERIO	DESCRIPCIÓN
Eficacia de la operación	Hace referencia a la capacidad de generar los flóculos y que no se rompan generando un movimiento “turbulencia” leve que permita mezclar el floculante con el agua adquiriendo la capacidad de

CRITERIO	DESCRIPCIÓN
	disminuir la turbiedad hasta los parámetros establecidos. Donde para los parámetros del gradiente, el tiempo de operación y el régimen de momento son los principales factores de referencia para este criterio.
Costos	Al igual que en la unidad de coagulación los costos asociados a la inversión inicial de los equipos, al igual que costos de operación como lo son electricidad, insumos, mantenimiento y mano de obra para el correcto funcionamiento.
Complejidad de operación	Uno de los factores más importantes en esta situación es la necesidad de que la comunidad pueda operar y mantener la planta después de una capacitación puesto que la contratación de un personal más certificado podría llegar a ser muy costoso. Para esta unidad se tiene en cuenta la facilidad de limpieza y la frecuencia de mantenimientos, así como la complejidad de los mismos.
Área requerida	A pesar de que el área es un factor importante no es crucial ya que cuentan con una zona importante disponible.

**Nota.** Esta tabla muestra la descripción de cada criterio establecido para la selección de la unidad de floculación.

Comprendiendo la situación actual de la comunidad como son sus limitaciones socioeconómicas y sus ventajas geográficas se proponen los siguientes porcentajes de importancia para cada criterio establecido, expuestos en la Tabla 32.

**Tabla 32.**

*Porcentajes de importancia de cada criterio*

CRITERIO	IMPORTANCIA
Eficacia de la operación	35%
Costos	30%
Complejidad de operación	25%
Área requerida	10%

**Nota.** Esta tabla muestra los porcentajes de importancia para cada criterio.

Se analiza diferentes sistemas de coagulación, los cuales permiten llevar a cabo el proceso de floculación teniendo en cuenta los flujos calculados en el capítulo 8 de la demanda de agua, puesto que el caudal a trabajar es inferior a los 50 L/s. [5]

**Tabla 33.**

*Matriz de selección de la unidad de floculación*

CRITERIO	FLUJO HORIZONTAL		MECÁNICO		TIPO COX		TIPO ALABAMA	
	C <sub>i</sub>	Resultado	C <sub>i</sub>	Resultado	C <sub>i</sub>	Resultado	C <sub>i</sub>	Resultado
Eficacia de la operación	4	1,4	5	1,75	4	1,4	4	1,4
Costos	5	1,5	3	0,9	4	1,2	4	1,2
Complejidad de operación	5	1,25	3	0,75	4	1	4	1

CRITERIO	FLUJO HORIZONTAL		MECÁNICO		TIPO COX		TIPO ALABAMA	
	C <sub>i</sub>	Resultado	C <sub>i</sub>	Resultado	C <sub>i</sub>	Resultado	C <sub>i</sub>	Resultado
Área requerida	3	0,3	4	0,4	3	0,3	2	0,2
Total	4,45		3,8		3,9		3,8	

**Nota.** Esta tabla muestra la matriz de selección para escoger la unidad de floculación más adecuada al proceso.

Se determina que para el contexto socioeconómico de la población Embera un floculador horizontal, siendo el más adecuado ya que cumple con las características expuestas en la Tabla 34.

**Tabla 34.**

*Justificación del floculador de flujo horizontal*

CRITERIO	JUSTIFICACIÓN
Eficacia de la operación	Para esta unidad es necesario asegurarse que el tiempo de operación sea el óptimo para la formación de los flóculos. Esta unidad permite un mezclado lento con poca turbulencia, sin dejar de ser un mezclado uniforme con tiempos lo suficientemente largos que permitan la formación de flóculos, pero con pocas probabilidades de que estos se rompan, perdiendo el proceso ya realizado. [5], [7], [9], [10]
Costos	Es una tecnología de baja inversión inicial puesto que no requiere equipos complejos ni materiales costosos. Tampoco necesita muchos recursos para su operación ni su mantenimiento puesto que es meramente hidráulica y su operación aprovechando la gravedad y los baffles del sistema. [5], [9]

CRITERIO	JUSTIFICACIÓN
Complejidad de operación	Es un sistema duradero sencillo de operar fácil, de mantener puesto que no requiere el cambio de piezas muy a menudo, ni elementos complejos de usar. [5], [7], [10]
Área requerida	Para aprovechar la energía hidráulica y tener un mezclado lento con poca turbiedad para que no se rompan los flóculos es necesario un área extensa para asegurar la posterior precipitación de los flóculos y otra unidad de floculación igual para que pueda operar una mientras la otra está en mantenimiento. [4], [6]

**Nota.** Esta tabla muestra la justificación del floculador horizontal seleccionado para el sistema de potabilización.

#### 8.4. Floculante

Para el proceso de floculación se requiere de un agente floculante, los cuales existen varios criterios para seleccionar el floculante más adecuado para el floculador seleccionado anteriormente que se describen en la Tabla 35.

**Tabla 35.**

*Descripción criterios Floculantes*

CRITERIO	DESCRIPCIÓN
Formación de Floccs	Se determina como la capacidad de aglomerar los coágulos de anterior unidad, y que no se rompan fácilmente permitiendo sedimentar los contaminantes. Donde 5 será el que más flóculos produzca en las condiciones de operación y 1 el que no sea capaz de producir los flóculos o no sean estables.
Costos	El valor en el mercado por kg de sustancia. Donde el más económico será 5 y 1 será el más costoso.
Disponibilidad en el mercado	La facilidad de obtener esta sustancia a lo largo del año puesto que la ausencia de este significaría un desabastecimiento para la comunidad, siendo 5 muy disponible y 1 muy difícil de conseguir.

CRITERIO	DESCRIPCIÓN
Corrosividad	Es la capacidad la sustancia de generar el fenómeno de corrosión en los equipos del sistema. Identificando a 5 como no corrosivo y 1 como muy corrosivo.
Transporte	Al igual que en los coagulantes, la naturaleza de la sustancia repercute en la facilidad de transporte, teniendo en cuenta que es una zona de difícil acceso, aumentaran los precios en caso de que no sea fácil el transporte. Siendo 5 la que tenga un menor peso y estado de la materia sea lo más compacto y fácil de manipular, mientras que uno será el que requiera más tecnología para su transporte y manipulación son los gases.

**Nota.** Esta tabla muestra la descripción de cada criterio establecido para la selección del floculante.

De acuerdo a los criterios establecidos anteriormente, se plantean porcentajes de importancia para cada uno de ellos, teniendo en cuenta las condiciones socioeconómicas que presenta la comunidad al momento de su utilización adecuada frente al sistema de tratamiento de agua potable, los cuales se exponen en la Tabla 36.

**Tabla 36.**

*Porcentajes de importancia*

CRITERIO	IMPORTANCIA
Formación de Floccs	35%
Costos	30%
Disponibilidad en el mercado	20%
Corrosividad	10%
Transporte	5%

**Nota.** Esta tabla muestra los porcentajes de importancia para cada criterio.

Para la selección del floculante adecuado para el proceso de floculación, se plantean la matriz de selección expuesta en la Tabla 37.

**Tabla 37.**

*Matriz de selección del floculante*

CRITERIO	POLIACRILAMIDAS ANIÓNICAS		POLIACRILAMIDAS NO IÓNICOS		POLIACRILAMIDAS CATIÓNICOS	
	C <sub>i</sub>	Resultado	C <sub>i</sub>	Resultado	C <sub>i</sub>	Resultado
Formación de Floccs	5	1.75	4	1.4	5	1.75
Costos	4	1.2	4	1.2	4	1.2
Disponibilidad en el mercado	5	1	5	1	4	0.8
Corrosividad	4	0.4	3	0.3	5	0.5
Transporte	4	0.2	4	0.2	4	0.2
Total	4.55		4.1		4.45	

**Nota.** Esta tabla muestra la matriz de selección para escoger el floculante más adecuada al proceso de floculación.

Con base a la matriz de selección establecida anteriormente se escoge como agente floculante las poliacrilamidas aniónicas (L-1569A), donde se justifican con respecto a cada criterio mediante la Tabla 38.

**Tabla 38.**

*Justificación del floculante de poliacrilamidas aniónicas (L-1569A)*

CRITERIO	JUSTIFICACIÓN
Formación de Floccs	Caracterizados por tener grupos ionizados negativamente, lo que conlleva una formación de flóculos eficiente y permite una buena sedimentación. [5], [10]

CRITERIO	JUSTIFICACIÓN
Costos	Debido a su alta producción e implementación a nivel mundial es uno de los floculantes más económicos del mercado. [9], [14], [23]
Disponibilidad en el mercado	Además de económico también tiene una gran disponibilidad permitiendo un abastecimiento sencillo a lo largo del año. [14], [23]
Corrosividad	Al ser un compuesto que genera iones este tiende a generar problemas de corrosión, pero frente a los otros floculantes este presenta menor afectaciones a los diferentes materiales utilizados para el floculador. [4], [9]
Transporte	Debido a que se presentan al momento de aplicar los floculantes en estado líquido, el transporte del mismo no genera afectaciones frente al proceso. [10]

**Nota.** Esta tabla muestra la justificación de las poliacrilamidas aniónicas (L-1569A) como floculante para el sistema de potabilización.

Debido a que este trabajo está enfocado a la teoría del diseño del sistema de purificación del agua, la dosis necesaria para el floculador depende de datos experimentales que determinen la adición o no de un agente floculante, de ser necesaria la dosificación frente a los resultados que se obtenga en su debida experimentación, se recomienda el uso del floculante seleccionado (Poliacrilamidas aniónicas).

### 8.5. Unidad de sedimentación

Como se mencionó anterior mente una vez formados los flóculos es necesario una unidad donde se logre separar por diferencia de densidades, donde estos quedan en el fondo de la unidad y posteriormente son drenados para su disposición y tratamiento como materia orgánica y borras a lo cual se le denomina como lodos. [5]

Para esta unidad existen diferentes tecnologías como lo son clarificadores convencionales, de placas paralelas o lamelares, de manto de lodos. Para identificar cual es la mejor opción para el resguardo se tienen en cuenta los siguientes criterios con su



respectivo porcentaje de importancia frente a las condiciones socioeconómicas de la comunidad.

**Tabla 39.**

*Criterios diseño clarificador*

CRITERIO	IMPORTANCIA
Eficiencia de la operación	35%
Costos	30%
Complejidad de operación	10%
Área requerida	25%

**Nota.** Esta tabla muestra los porcentajes de importancia de cada criterio seleccionado.

Con el objetivo de esclarecer de una forma más acertada el porqué de cada criterio se hace una descripción de cada uno de ellos en la siguiente Tabla 40.

**Tabla 40.**

*Descripción de criterios de selección para la unidad de sedimentación*

CRITERIO	DESCRIPCIÓN
Eficacia de la operación	Este criterio hace referencia al tiempo necesario para poder llevar a cabo la sedimentación de partículas patógenas, en el menor tiempo posible sin romper los flóculos y entregando una calidad de agua que cumpla los parámetros para la siguiente unidad de tratamiento
Costos	Se tienen en cuenta los costos de inversión inicial de los equipos, químicos, mantenimiento y energía
Complejidad de operación	Es necesario que la comunidad tenga la capacidad de operar y mantener las instalaciones sin la necesidad de contratar mano de obra externa costosa, si no que ellos mismos puedan ser autosuficientes en el manejo del sistema

CRITERIO	DESCRIPCIÓN
Área requerida	Es criterio tiene en cuenta que entre mayor sea el área requerida mayores serán los costos de inversión, así como los impactos en el ambiente, fauna, flora aledaña a las instalaciones.

**Nota.** Esta tabla muestra la descripción de cada criterio para la selección de la unidad de clarificación.

Continuando con el método de selección y los valores relacionados de desempeño de cada unidad propuestos en la Tabla 39, se logra obtener los siguientes resultados.

**Tabla 41.**

*Matriz de selección unidad de sedimentación*

CRITERIO	CONVENCIONAL		LAMELAR		MANTO DE LODOS	
	C <sub>i</sub>	Resultado	C <sub>i</sub>	Resultado	C <sub>i</sub>	Resultado
Eficacia de la operación	4	1,4	5	1,75	2	0,7
Costos	4	1,2	3	1,5	4	1,2
Complejidad de operación	5	0,5	4	0,4	3	0,3
Área requerida	2	0,5	4	1	4	1
Total	3,6		4,05		3,2	

**Nota.** Esta tabla muestra la matriz de selección para escoger la unidad de clarificación más adecuada al sistema de potabilización.

Con base en la anterior tabla se escoge la unidad de clarificación lamelar o de alta tasa. Posteriormente con el objetivo de esclarecer la anterior elección se expondrá a detalle el porqué de cada calificación para el clarificador laminar.

**Tabla 42.***Justificación elección de unidad de clarificación lamelar*

<b>CRITERIO</b>	<b>JUSTIFICACIÓN</b>
Eficacia de la operación	Los clarificadores lamelares requieren menores tiempos de sedimentación, puesto que las partículas sedimentan hacia las plaquetas donde varios flóculos se juntan y se empiezan a deslizar por las placas hasta llegar a la tolva de lodos para ser removidos, [26] esto permite que al agruparse los flóculos la velocidad a la que llegan al fondo como grupo sea mayor que en los clarificadores convencionales. Además, puesto que la turbiedad de la muestra es muy baja no es recomendable usar un clarificador de manto de lodos puesto que no podría cumplir con la base de diseño del mismo [5], [7], [10]
Costos	Los costos de estos equipos son bajos ya que al tener bajos tiempos de residencia su volumen es menor al de uno convencional, así como los materiales no requieren tanta resistencia puesto que la carga es menor al tener que usar una mejor cantidad de volumen, sin embargo, el costo de las placas dependiendo de su material puede ser necesario su cambio cada ciertos de acuerdo a las condiciones ambientales a las que estén sometidas, como por ejemplo las placas de plástico tienden a desgastarse por efecto de la luz por lo cual es importante tener este factor en caso de que este material sea el seleccionado. [5], [15]
Complejidad de operación	La operación del sistema solo requiere asegurar la velocidad de entrada y el tiempo de retención adecuado variables que se pueden controlar desde el diseño, mientras que su mantenimiento requiere la limpieza de las bandejas y drenaje de sólidos, siendo este procedimiento menos complejo y exigente que para un clarificador convencional ya que es un tamaño mucho más pequeño y la tolva de lodos facilita el drenaje de sólidos sedimentados. [7], [10]

CRITERIO	JUSTIFICACIÓN
Área requerida	Requiere una menor área y por consecuente menos costos puesto que la distancia de que necesita recorrer la partícula es mucho menor, entre menor distancia menos tiempo de retención y por consecuente un menor volumen, disminuyendo costos e impactos ambientales anteriormente mencionados. [5], [7], [10]

**Nota.** Esta tabla muestra la justificación del clarificador lamelar seleccionado para el sistema de potabilización.

### 8.6. Unidad de filtración

Para el diseño del sistema de tratamiento de agua potable, es necesaria una etapa de filtración para la remoción de sólidos suspendidos y partículas coloidales que resultan de los procesos de coagulación, floculación y sedimentación, removiendo microorganismos patógenos resistentes a la desinfección por cloro. De acuerdo a esto se plantea una matriz de selección de la unidad de filtración frente a varios criterios con su respectivo valor de importancia que se presentan en la Tabla 43.

**Tabla 43.**

*Porcentaje de importancia de los criterios de la unidad de filtración*

CRITERIO	IMPORTANCIA
Remoción de contaminantes	30%
Eficiencia de operación	25%
Costos	20%
Complejidad de operación	15%
Área requerida	10%

**Nota.** Esta tabla muestra los porcentajes de importancia para cada criterio seleccionado.

De acuerdo a los criterios establecidos, se describe cada uno de estos para realizar la matriz de selección del proceso de filtración, los cuales se observan en la Tabla 44.

**Tabla 44.**

*Descripción de criterios de selección de la unidad de filtración*

<b>CRITERIO</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
Remoción de contaminantes	Capacidad de la unidad de filtración para retirar los contaminantes aún presentes luego del proceso de sedimentación, cumpliendo con la normatividad frente a la calidad del agua que debe presentar luego de dicho proceso.
Eficiencia de operación	Tiempo de retención de las partículas presentes en el agua, siendo más eficiente para tiempos mínimos.
Costos	Costos asociados a la inversión inicial de los equipos, al igual que los costos de operación, electricidad, mantenimiento, etc.
Complejidad de operación	Factor en el que influye la necesidad de que el operario pueda manipular y mantener el equipo, teniendo en cuenta la facilidad de limpieza y la frecuencia de mantenimientos, así como la dificultad de los mismos.
Área requerida	Factor que identifica el área que requiere para realizar el proceso de filtración, a pesar de ser un factor importante no es crucial ya que cuentan con una zona importante disponible.

**Nota.** Esta tabla muestra la descripción de cada criterio para la selección de la unidad de filtración.

Frente a los diferentes tipos de unidades de filtración que se tiene para el sistema de potabilización se realiza la respectiva calificación de cada criterio, obteniendo la matriz de selección descrita en la Tabla 45.

**Tabla 45.***Matriz de selección de la unidad de filtración*

CRITERIO	FILTRACIÓN RÁPIDA		FILTRACIÓN LENTA		FILTRACIÓN BIOLÓGICA	
	C <sub>i</sub>	Resultado	C <sub>i</sub>	Resultado	C <sub>i</sub>	Resultado
Remoción de contaminantes	4	1.2	3	0.9	5	1.5
Eficiencia de operación	5	1.25	4	1	5	1.25
Costos	4	0.8	5	1	5	1
Complejidad de operación	5	0.75	3	0.45	2	0.3
Área requerida	4	0.4	5	0.5	3	0.3
Total	4.4		3.85		4.35	

**Nota.** Esta tabla muestra la matriz de selección para escoger la unidad de filtración más adecuada al sistema de potabilización.

Con base a la matriz de selección, se establece una unidad de filtración rápida, debido a que tiene una mayor facilidad de operar y obtener porcentajes de remoción altos con respecto a los otros y también se puede especificar la elección de esta unidad descrita en la Tabla 46.

**Tabla 46.***Justificación de la unidad de filtración rápida*

CRITERIO	JUSTIFICACIÓN
Remoción de contaminantes	La filtración rápida permite que se retiren los contaminantes presentes en el agua como lo son los microorganismos patógenos debido a su alta eficiencia de los medios filtrantes que se utilizan en esta unidad (antracita y grava). [7], [8]

Eficiencia de operación	Para esta unidad es necesario asegurarse que el tiempo de operación sea el óptimo para retirar todos los contaminantes que queden presentes luego de los anteriores tratamientos y asegurar una baja concentración de E. coli y coliformes. [5], [8]
Costos	Es una tecnología de baja inversión inicial puesto que no requiere equipos complejos ni materiales costosos. Tampoco necesita muchos recursos para su operación ni su mantenimiento puesto que es meramente hidráulica y su operación aprovechando la gravedad debido a que se realiza en flujo descendente. [5], [15]
Complejidad de operación	Es un sistema duradero sencillo de fácil operación, de mantener puesto que no requiere el cambio de piezas muy a menudo, ni elementos complejos de usar. [5], [7], [8]
Área Requerida	Para mantener una alta eficiencia en la filtración, los medios filtrantes en esta unidad permiten establecer áreas de contacto eficientes de los lechos y obtener una baja concentración de contaminantes y una baja turbiedad. [5], [7], [8]

**Nota.** Esta tabla muestra la justificación del filtro rápido de arena seleccionado para el sistema de potabilización.

Los medios filtrantes que se utilizan para la unidad se establecen a partir de la calidad del agua que se tiene luego de los procesos de tratamiento previos, donde se identifica las propiedades más relevantes para elegir de mejor manera el medio filtrante que se requiere, los medios que son utilizados más frecuentemente son granulares como los de arena sílice, carbón antracita, carbón activado granulado y grava, y los fibrosos que consisten en capas de fibras sintéticas utilizados en filtraciones biológicas primordialmente.

De acuerdo a esto para el sistema de potabilización para este trabajo se establece en la unidad de filtración un lecho mixto de arena y grava debido a la gran cantidad de microorganismos patógenos que se encuentran en el efluente que se va a tratar.

### 8.7. Unidad de desinfección

Luego de establecer los procesos de potabilización y haber reducido los niveles de contaminantes en gran medida, se requiere de una unidad de desinfección que permita reducir los niveles por debajo de los parámetros del agua establecidos por la Resolución 2115 de 2007, es decir, casi nula las concentraciones de coliformes totales y E. coli, el cual logre ser apto para su distribución y consumo por la comunidad indígena en estudio.

En este proceso se pueden establecer diferentes tipos de desinfectantes como cloro (Hipocloritos), dióxido de cloro, ozono y radiación UV, los cuales se consideran como los más adecuados expuestos por el Servicio de Salud Pública del Consejo Nacional de Investigación Científica de los Estados Unidos. Para ello se plantea una matriz de selección que determine el mejor desinfectante a utilizar para este sistema de potabilización mediante varios criterios descritos en la tabla 48, con su respectivo nivel de importancia de acuerdo al contexto de la comunidad frente a su buen uso en el proceso, descritos en la Tabla 47.

**Tabla 47.**

*Porcentaje de importancia de los criterios del desinfectante*

CRITERIO	IMPORTANCIA
Capacidad de destrucción de patógenos	35%
Eficiencia de operación	30%
Costos	20%
Complejidad de operación	15%

**Nota.** Esta tabla muestra los porcentajes de importancia para cada criterio seleccionado.



**Tabla 48.**

*Descripción de criterios de selección del desinfectante*

<b>CRITERIO</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
Capacidad de destrucción de patógenos	Capacidad de la unidad de desinfección para retirar los contaminantes patógenos que estén presentes luego del proceso de filtración, cumpliendo con la normatividad frente a la calidad del agua que debe presentar luego de dicho proceso.
Eficiencia de operación	Tiempo de retención hidráulico del tanque de desinfección, siendo más eficiente para tiempos mínimos.
Costos	Costos asociados a la inversión inicial de los equipos y desinfectante, al igual que los costos de operación, electricidad, mantenimiento, etc.
Complejidad de operación	Factor en el que influye la necesidad de que el operario pueda manipular y mantener el equipo, teniendo en cuenta la facilidad de limpieza y la frecuencia de mantenimientos, así como la dificultad de estos.
Área requerida	Factor que identifica el área que requiere para realizar el proceso de desinfección, a pesar de ser un factor importante no es crucial ya que cuentan con una zona importante disponible.

**Nota.** Esta tabla muestra la descripción de cada criterio para la selección del desinfectante a utilizar en el proceso de desinfección.

Con base a los niveles de importancia se realiza la matriz de selección para los diferentes desinfectantes utilizados para potabilización de agua, los cuales se describen en la Tabla 49.

**Tabla 49.***Matriz de selección del desinfectante*

CRITERIO	HIPOCLORITO DE SODIO		DÍOXIDO DE CLORO		OZONO	
	C <sub>i</sub>	Resultado	C <sub>i</sub>	Resultado	C <sub>i</sub>	Resultado
Capacidad de destrucción de patógenos	4	1.4	4	1.4	5	1.75
Eficacia de operación	5	1.5	4	1.2	5	1.5
Costos	5	1	4	0.8	3	0.6
Complejidad de operación	4	0.6	3	0.45	3	0.45
Total		4.5		3.85		4.3

**Nota.** Esta tabla muestra la matriz de selección para escoger el desinfectante más adecuado al sistema de potabilización.

De acuerdo a la matriz realizada se establece que el desinfectante que se va a utilizar es el hipoclorito de sodio en solución con una dosis mínima de 1.7 mg/L y una máxima de 23.1 mg/L, teniendo un rango de concentración entre 1 al 15% en peso, con base a lo establecido en el RAS 2000. Con esto se especifica la elección del desinfectante de acuerdo a la tabla 50.

**Tabla 50.***Justificación del hipoclorito de sodio como desinfectante*

CRITERIO	JUSTIFICACIÓN
Capacidad de destrucción de patógenos	Para esta unidad de desinfección se requiere del desinfectante de cloro (hipocloritos) que permite reducir al máximo las concentraciones de bacterias y virus que puedan estar presentes luego de los tratamientos anteriores, este desinfectante tiene una alta

CRITERIO	JUSTIFICACIÓN
	eficiencia frente a la destrucción de los mismos sin afectar la calidad del agua. [5], [8], [27]
Eficacia de operación	Para esta unidad es necesario asegurarse que el tiempo de operación sea el óptimo para retirar al máximo bacterias y virus, por lo que el hipoclorito de sodio aprovecha su naturaleza de realizar su respectiva remoción de dichos contaminantes de manera óptima y eficaz. [5], [8], [27]
Costos	Es una tecnología de baja inversión inicial puesto que no requiere equipos complejos ni materiales costosos. Tampoco se necesita de muchos recursos para su operación ni su mantenimiento debido a su bajo costo. [4], [7]
Complejidad de operación	Es un sistema duradero sencillo de fácil operación, de mantener puesto que no requiere el cambio de piezas muy a menudo, ni elementos complejos de usar, ni requiere de una compleja red de aducción del desinfectante. [5], [7], [8]

**Nota.** Esta tabla muestra la justificación del hipoclorito de sodio seleccionado como desinfectante para el sistema de potabilización.

### 8.8. Tratamiento de lodos residuales

El principal subproducto del tratamiento de aguas, son los lodos o borras, para este caso se desarrollará una matriz de selección que permita establecer los mejores y principales procesos para el tratamiento y disposición de este subproducto.

Se tomará como premisa que se obtiene unos lodos como residuo no peligroso y los sólidos presentes los lodos son más densos que el agua. Con base en lo anterior, se propone los siguientes procesos como indica Oropeza García. [28]

- Espesamiento
- Estabilización
- Deshidratación

- Disposición

De acuerdo con eso se empieza a desarrollar una matriz de selección de unidades que permitan llevar a cabo cada proceso de la manera más adecuada.

### **8.8.1. Espesamiento**

Este proceso consiste en la reducción del contenido de agua presente en los lodos. La cual una vez retirada se propone recircularla al proceso, sin embargo, es necesario confirmar si estos viable experimentalmente.

Para seleccionar la mejor alternativa se establecen los siguientes criterios de selección con sus respectivos porcentajes de importancia, de acuerdo a las condiciones que posee la comunidad para aprovechar los lodos residuales que se obtienen del sistema de tratamiento de agua potable.

**Tabla 51.**

*Porcentaje de importancia para cada criterio*

<b>CRITERIO</b>	<b>IMPORTANCIA</b>
Eficacia de la operación	20%
Costos	35%
Complejidad de operación	25%
Área requerida	20%

**Nota.** Esta tabla muestra los porcentajes de importancia para cada criterio seleccionado.

El objetivo de la siguiente tabla es justificar el porcentaje de importancia asignado a cada criterio ya expuesto anteriormente.

**Tabla 52.***Descripción de criterios de selección*

CRITERIO	DESCRIPCIÓN
Eficacia y eficiencia de la operación	La capacidad de cada unidad para reducir el contenido de agua en los sólidos y el tiempo que toma en hacer ese proceso. Donde entre menor sea el contenido, mejor calificación tendrá la unidad, ya que disminuirá el volumen necesario en las unidades siguientes.
Costos	Siendo una comunidad que no cuenta con grandes recursos, la economía es un factor muy importante para la viabilidad del proyecto.
Complejidad de operación	Este sistema tiene como objetivo que la comunidad tenga la oportunidad de ser autosuficiente, por lo cual se busca la más sencilla operación y mantenimiento de las unidades
Área requerida	Es criterio tiene en cuenta que entre mayor sea el área requerida mayores serán los costos de inversión, así como los impactos en el ambiente, fauna, flora aledaña a las instalaciones.

**Nota.** Esta tabla muestra la descripción de cada criterio para la selección de la unidad de espesamiento.

Con base en las anteriores tablas se desarrolla una matriz de selección comprando 3 de las principales unidades de espesamiento que se usan actualmente en el mercado.

**Tabla 53.***Matriz de selección de alternativa para espesamiento*

CRITERIO	GRAVEDAD		FLOTACIÓN		MECÁNICO	
	C <sub>i</sub>	Resultado	C <sub>i</sub>	Resultado	C <sub>i</sub>	Resultado
Eficacia y eficiencia de la operación	3	0.6	1	0.2	4	0.8
Costo	4	1.4	2	0.7	1	0.35

CRITERIO	GRAVEDAD		FLOTACIÓN		MECÁNICO	
	C <sub>i</sub>	Resultado	C <sub>i</sub>	Resultado	C <sub>i</sub>	Resultado
Complejidad de la operación	5	1.25	3	0.75	2	0.5
Área requerida	1	0.2	3	0.6	4	0.8
Total	3.45		2.25		2.45	

**Nota.** Esta tabla muestra la matriz de selección para escoger la unidad de espesamiento más adecuado al sistema de tratamiento de lodos.

La unidad de espesamiento por gravedad es la que mejores resultados podría llegar a dar. Sin embargo, para esclarecer el puntaje en cada criterio para la unidad de gravedad se genera la siguiente Tabla 54.

**Tabla 54.**

*Justificación unidad de espesamiento por gravedad*

CRITERIO	JUSTIFICACIÓN
Eficacia y eficiencia de la operación	“Mediante este método se puede producir un lodo con un contenido de sólidos del 8 al 10 por ciento o más. Esto significa que, con un lodo original del dos por ciento, se han eliminado aproximadamente cuatro quintas partes del agua y se ha logrado uno de los objetivos en el tratamiento de lodos”. [29] valor que a diferencia de por aire disuelto no se lograría por la diferencia de densidad de las partículas con el agua, a pesar de que no se lleva a cabo en un tiempo tan corto como el de una unidad de tambor rotativo que permite unos resultados similares o mejores en un menor tiempo. [10], [30]
Costos	Los costos de inversión inicial constan del tanque que permita la separación y la barredora para evitar que estos se queden pegados a las paredes. Equipos más fáciles de conseguir, más económicos en

CRITERIO	JUSTIFICACIÓN
	su inversión inicial y su mantenimiento que el sistema de flotación o el sistema de tambor giratorio. Además, requiere menos energía para operar y horas labor para su operación. [29], [30]
Complejidad de operación	El sistema de tambor giratorio necesita un operario durante toda la operación, así como mantenimiento más frecuente y limpieza con agua a presión. [28] Donde el sistema de flotación como se mencionó anteriormente no cumpliría con los requisitos por la densidad de las partículas. [10], [30]
Área requerida	Necesita una mayor área debido al tiempo que requiere para el proceso, oscilando esos tanques entre 6 a 10 m de diámetro. [10], [30]

**Nota.** Esta tabla muestra la justificación de la unidad de espesamiento por gravedad seleccionado para el sistema de tratamiento de lodos residuales.

### **8.8.2. Estabilización**

La estabilización de los lodos permite reducir la cantidad de materia orgánica y patógenos, eliminando olores y la capacidad de putrefacción de la materia orgánica presente en los mismos mediante diferentes procesos químicos utilizando componentes inorgánicos o procesos bioquímicos de manera aerobia o anaerobia, el cual se establece una matriz de selección que permita seleccionar el proceso más adecuado para la estabilización de los lodos que se generan del sistema de potabilización seleccionado anteriormente, mediante los porcentajes de importancia que tendrá cada criterio establecidos en la Tabla 55. [31]

**Tabla 55.**

*Porcentajes de importancia de los criterios seleccionados*

CRITERIO	IMPORTANCIA
Eficacia y eficiencia de la operación	30%
Costos	25%
Complejidad de operación	25%
Área requerida	20%

**Nota.** Esta tabla muestra los porcentajes de importancia para cada criterio seleccionado.

Con los porcentajes de importancia asignado a cada criterio de acuerdo a las condiciones que se disponen para el sistema de potabilización, se describen cada uno de estos en la Tabla 56 y así realizar la matriz de selección de manera adecuada.

**Tabla 56.**

*Descripción de criterios para la selección de la alternativa del proceso de estabilización*

CRITERIO	DESCRIPCIÓN
Eficacia y eficiencia de la operación	La capacidad de cada unidad para reducir el contenido de materia orgánica y microorganismos patógenos en los lodos residuales y el tiempo que toma en hacer dicho proceso. Donde entre menor sea el contenido, mejor calificación tendrá la unidad, ya que disminuirá el volumen necesario en las unidades posteriores.
Costos	Siendo una comunidad que no cuenta con grandes recursos, la economía es un factor muy importante para la viabilidad del proyecto, al momento de seleccionar la unidad de estabilización.



CRITERIO	DESCRIPCIÓN
Complejidad de operación	Este sistema tiene como objetivo que la comunidad tenga la oportunidad de ser autosuficiente, por lo cual se busca la más sencilla operación y mantenimiento de la unidad de estabilización.
Área requerida	Es criterio tiene en cuenta que entre mayor sea el área requerida mayores serán los costos de inversión, así como los impactos en el ambiente, fauna, flora aledaña a las instalaciones.

**Nota.** Esta tabla muestra la descripción de cada criterio para la selección de la unidad de estabilización de lodos.

De acuerdo a los criterios previamente explicados se procede a realizar la matriz de selección, comparando 3 alternativas más usadas en el mercado, lo que permite seleccionar la mejor alternativa para el proceso de estabilización de los lodos residuales obtenidos del sistema de potabilización, la cual se observa en la Tabla 57.

**Tabla 57.**

*Matriz de selección para el proceso de estabilización de lodos residuales*

CRITERIO	QUÍMICA		AERÓBICA		ANAERÓBICA	
	C <sub>i</sub>	Resultado	C <sub>i</sub>	Resultado	C <sub>i</sub>	Resultado
Eficacia y eficiencia de la operación	4	1.2	3	0.9	4	1.2
Costos	2	0.5	2	0.5	4	1
Complejidad de la operación	2	0.5	4	1	3	0.75
Área requerida	4	0.8	2	0.4	4	0.8
Total	3		2.8		3.75	

**Nota.** Esta tabla muestra la matriz de selección para escoger la unidad de estabilización más adecuado al sistema de tratamiento de lodos.

Con base a esto se evidencia como mejor alternativa la estabilización anaeróbica, el cual se justifica frente a cada criterio expuestos en la Tabla 58.

**Tabla 58.**

*Justificación estabilización anaeróbica*

CRITERIO	JUSTIFICACIÓN
Eficacia y eficiencia de la operación	Este proceso reduce en gran medida la cantidad de biomasa y microorganismos patógenos frente a los otros tipos de estabilización (35 – 60% de remoción),[32] y eliminando olores que contengan los lodos residuales tratados, también se aprovecha como recuperación de energía gracias a la producción de metano que se genera debido al proceso anaeróbico que se somete dichos lodos. Lo cual lo hace un proceso eficiente y viable. [33], [34]
Costos	Los costos de inversión para la estabilización anaeróbica se ven reflejados en el tamaño del reactor que se debe utilizar, siendo un volumen mínimo, reduciendo costos en materiales y electricidad gracias al uso de microorganismos anaeróbicos. [33] Además, estos permiten la posible producción de energía y fertilizantes, generando ganancias a partir de un subproducto contaminante. [34]
Complejidad de operación	El proceso requiere de tiempos de reacción que permita que los microorganismos realicen el proceso de estabilización anaeróbica, lo cual no requiere de mecanismos complejos para que realicen dicho proceso, ahorrando costos adicionales. [34], [35]
Área requerida	El volumen que se requiere para el proceso es mínimo, lo que permite aumentar la eficiencia frente a un aumento de cantidad de lodos a procesar evitando tiempos largos de operación. [32], [34], [35]

**Nota.** Esta tabla muestra la justificación de la unidad de estabilización anaeróbica seleccionado para el sistema de tratamiento de lodos residuales.

### 8.8.3. Deshidratación

El proceso de deshidratación permite reducir el volumen de los lodos, al mismo tiempo que disminuye el contenido de humedad presente en los mismos, con el objetivo de mejorar el manejo y transporte para su posterior disposición. De acuerdo con esto se establecen varios criterios que permitan seleccionar la mejor alternativa para dicho proceso, esto se evidencia en la Tabla 59, el cual presenta los porcentajes de importancia de cada uno de ellos.

**Tabla 59.**

*Porcentajes de importancia para la deshidratación de lodos*

CRITERIO	IMPORTANCIA
Eficacia y eficiencia de la operación	20%
Costos	35%
Complejidad de operación	20%
Área requerida	25%

**Nota.** Esta tabla muestra los porcentajes de importancia para cada criterio seleccionado.

Estos porcentajes se adecuan frente al contexto que presenta la comunidad actualmente, con esto se realiza la descripción de cada criterio se presenta en la Tabla 60.

**Tabla 60.**

*Descripción de criterios para la deshidratación de lodos*

CRITERIO	DESCRIPCIÓN
Eficacia y eficiencia de la operación	La capacidad de cada unidad para reducir el contenido de humedad restante en los lodos residuales y el tiempo que toma en hacer dicho proceso. Donde entre menor sea el contenido, mejor calificación tendrá

CRITERIO	DESCRIPCIÓN
	la unidad, ya que se deben adecuar las condiciones de dichos lodos para su posterior disposición final frente a la normatividad propuesta por el decreto 1287 de 2014.
Costos	Siendo una comunidad que no cuenta con grandes recursos, la economía es un factor muy importante para la viabilidad del proyecto, al momento de seleccionar la unidad de deshidratación, lo que conlleva a seleccionar la unidad que requiera de menor costo adicional y de mantenimiento.
Complejidad de operación	Este sistema tiene como objetivo que la comunidad tenga la oportunidad de ser autosuficiente, por lo cual se busca la más sencilla operación y mantenimiento de la unidad de deshidratación.
Área requerida	Este criterio tiene en cuenta que entre mayor sea el área requerida mayores serán los costos de inversión, así como los impactos en el ambiente, fauna, flora aledaña a las instalaciones, lo cual se debe seleccionar la unidad que más se acople al tamaño o volumen a tratar que se obtenga del sistema de potabilización.

**Nota.** Esta tabla muestra la descripción de cada criterio para la selección de la unidad de deshidratación de lodos.

De acuerdo a cada criterio establecido anteriormente, se procede a seleccionar la tecnología más adecuada mediante una matriz de selección expuesta en la tabla, que compara los tres diferentes tipos de deshidratación que se utilizan comúnmente en el mercado.

**Tabla 61.***Matriz de selección para la deshidratación de lodos*

CRITERIO	NATURAL		TERMICO		MECANICO	
	C <sub>i</sub>	Resultado	C <sub>i</sub>	Resultado	C <sub>i</sub>	Resultado
Eficacia de la operación	4	0,8	4	0,8	5	1
Costo	3	1,05	1	0,35	1	0,35
Complejidad de la operación	4	0,8	3	0,6	2	0,4
Área requerida	1	0,25	4	1	4	1
Total	2,9		2,75		2,75	

**Nota.** Esta tabla muestra la matriz de selección para escoger la unidad de deshidratación más adecuado al sistema de tratamiento de lodos.

Con dicha matriz se determina como la mejor alternativa de deshidratación por secado natural, con ello se justifica dicha selección frente a cada criterio establecido previamente.

**Tabla 62.***Justificación de la unidad de deshidratación por secado natural*

CRITERIO	JUSTIFICACIÓN
Eficacia y eficiencia de la operación	El secado natural permite reducir considerablemente la cantidad de humedad de los lodos tratados, manteniendo un contenido de humedad entre el 20 al 30%, sin requerir de tiempos prolongados en contacto con el ambiente, manteniendo las condiciones necesarias. [33], [34], [36]
Costos	Los costos para el proceso de secado natural no requieren de altos costos de implementación ni de consumo de energía, lo cual

CRITERIO	JUSTIFICACIÓN
	permite que sea económico y viable sin utilizar productos químicos adicionales de alto costo. [32], [34], [36]
Complejidad de operación	El proceso por secado natural no requiere de un sistema complejo para el funcionamiento del mismo, lo cual lo hace sencillo y fácil de monitorear, ahorrando costos adicionales en el equipo. [36]
Área requerida	El secado natural tiene grandes áreas que permite su alta eficiencia frente a la cantidad de humedad que retira sin tener limitaciones frente a la cantidad de lodos tratados que se obtienen de los procesos previos a este. [36]

**Nota.** Esta tabla muestra la justificación de la deshidratación por medio de eras de secado seleccionado para el sistema de tratamiento de lodos residuales.

#### **8.8.4. Disposición final**

Dentro de las alternativas de disposición final existen diferentes opciones de acuerdo a las características de los lodos después de ser tratados.

- El uso de estos como fertilizante para suelos cercanos, lo cual haría este proceso productivo una ganancia extra.
- Se podría reciclar para un sistema de sedimentación por lodos, sin embargo, al ser bastante baja la turbiedad no se recomienda.
- En la producción de ladrillos, aprovechando sus propiedades mecánicas.
- Producción de energía térmica y eléctrica a través del aprovechamiento del poder calorífico de estos.

Sin embargo, al no conocer la cantidad ni la composición, de manera teórica se proponen las anteriores alternativas para la disposición final de los lodos residuales.

## 9. DIMENSIONAMIENTO DE EQUIPOS

Se realiza el dimensionamiento de los equipos establecidos anteriormente de las matrices de selección, estableciendo como caudal de diseño el valor del caudal máximo diario.

Además, teniendo en cuenta que la zona cuenta con áreas montañosas, los diseños se desarrollan, la posibilidad de aprovechar la energía hidráulica de la diferencia de alturas entre las unidades.

La temperatura de la muestra de agua es de 3.4°C, con base a esto se determinan las propiedades físicas del mismo para el cálculo de algunas variables que influyan en los equipos establecidos mediante la Tabla 63.

**Tabla 63.**

*Propiedades físicas del agua a diferentes temperaturas*

T (°C)	DENSIDAD (kg/m <sup>3</sup> )	VISCOSIDAD DINÁMICA (Pa*s)	VISCOSIDAD CINEMÁTICA (m <sup>2</sup> /s)
0	999.9	1.79E-03	1.79E-06
1	999.9	1.73E-03	1.73E-06
2	999.9	1.68E-03	1.68E-06
3	1000	1.62E-03	1.62E-06
4	1000	1.57E-03	1.57E-06
5	1000	1.52E-03	1.52E-06
6	999.9	1.47E-03	1.47E-06
7	999.9	1.43E-03	1.43E-06
8	999.9	1.39E-03	1.39E-06
9	999.8	1.35E-03	1.35E-06
10	999.7	1.31E-03	1.31E-06
11	999.6	1.27E-03	1.27E-06

T (°C)	DENSIDAD (kg/m <sup>3</sup> )	VISCOSIDAD DINÁMICA (Pa*s)	VISCOSIDAD CINEMÁTICA (m <sup>2</sup> /s)
12	999.5	1.24E-03	1.24E-06
13	999.4	1.20E-03	1.20E-06
14	999.3	1.17E-03	1.17E-06
15	999.2	1.14E-03	1.14E-06
16	999.0	1.12E-03	1.12E-06
17	998.8	1.09E-03	1.09E-06
18	998.6	1.06E-03	1.06E-06
19	998.4	1.03E-03	1.03E-06
20	998.0	1.01E-03	1.01E-06

**Nota.** Esta tabla muestra la densidad, viscosidad dinámica y cinemática para el agua a diferentes temperaturas. Tomado de: W. A. Lozano Rivas. (2015). *Potabilización del agua: principios de diseño, control de procesos y laboratorio: Propiedades físicas del agua*". (1ª edición), [En línea]. Disponible: <https://search-ebshost-com.ezproxy.uamerica.edu.co/login.aspx?direct=true&db=nlebk&AN=1593375&lang=es&site=eds-live&scope=site>

Con base a lo anterior se dispone valores de densidad, viscosidad dinámica y cinemática para dicha temperatura, los cuales son 1000 kg/m<sup>3</sup>, 1.61x10<sup>-3</sup> Pa\*s y 1.61x10<sup>-6</sup> m<sup>2</sup>/s, respectivamente.

### 9.1. Vertedero triangular de 90°

Para el dimensionamiento del vertedero se establecen las ecuaciones descritas por el método gráfico de Lozano-Rivas y el método de Richter.

El método gráfico de Lozano-Rivas establece que es aplicable para caudales de diseño entre 0.1 y 500 L/s, proporciona gradientes entre 1100 y 2200 s<sup>-1</sup> y genera tiempos de mezcla entre 0.3 y 1.2 s, gracias a ello se emplea este método para el diseño del



vertedero triangular debido a que el caudal de diseño está por debajo de los 50 L/s y se requiere de tiempos cortos y gradientes eficientes. [5]

Primeramente, se determina el caudal unitario correspondiente al caudal de diseño a partir de la gráfica 1 obtenida a partir de la Tabla 64.

**Tabla 64.**

*Valores de características de la mezcla rápida obtenidas por el método de Lozano-Rivas*

Q (L/s)	q (m <sup>3</sup> /m*s)	G (1/s)	P/B	t (s)
0.1	0.009	1116	18	0.31
0.2	0.009	1116	9	0.31
0.3	0.009	1116	6	0.31
0.5	0.012	1116	3	0.31
1	0.015	1216	3.7	0.37
5	0.032	1379	2.6	0.47
10	0.049	1481	2.8	0.55
20	0.072	1579	2.6	0.62
50	0.126	1733	2.6	0.75
100	0.189	1855	2.6	0.86
500	0.502	2182	2.7	1.19

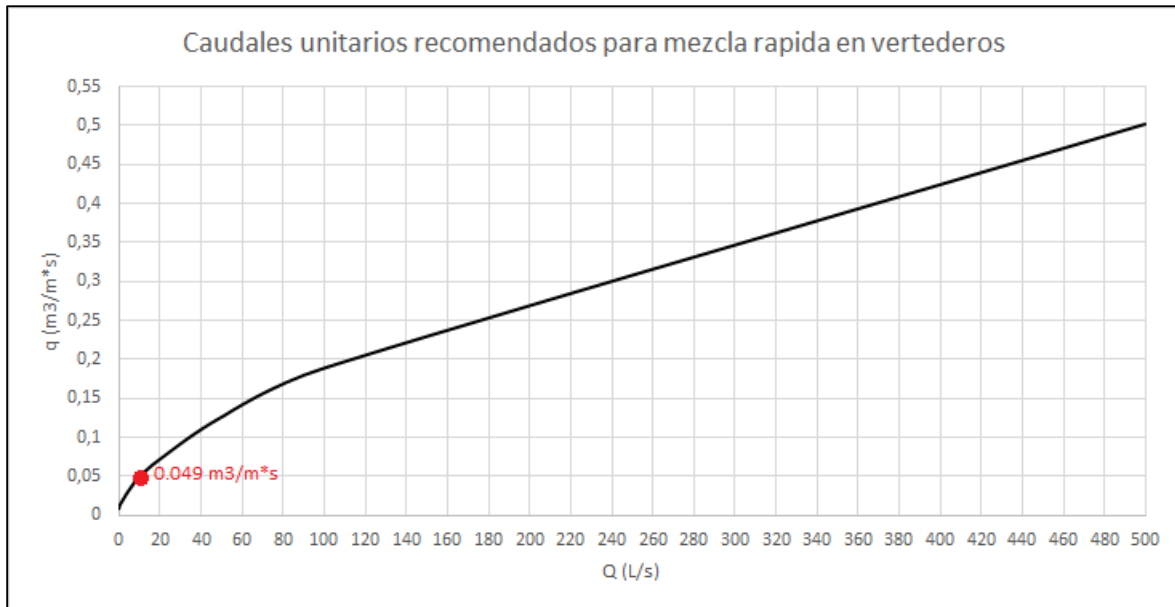
**Nota.** Esta tabla muestra los valores de caudal unitario, gradiente de mezcla, relación altura-ancho y tiempo de mezcla del vertedero para diferentes caudales de operación. Tomado de: W. A. Lozano Rivas. (2015). *Potabilización del agua: principios de diseño, control de procesos y laboratorio: Diseño de mezcladores rápidos*". (1ª edición), [En línea].

Disponible:

<https://search-ebscohost-com.ezproxy.uamerica.edu.co/login.aspx?direct=true&db=nlebk&AN=1593375&lang=es&site=eds-live&scope=site>

**Figura 13.**

*Caudales unitarios respecto a caudales de diseño*



**Nota.** Esta figura representa la gráfica del caudal unitario con respecto a diferentes caudales de diseño para el vertedero triangular de  $90^\circ$ .

De acuerdo a la figura 13 se obtiene para el caudal de diseño de 14.19 L/s un caudal unitario de  $0.049 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{m}$ .

Con base en la tabla 65 se identifica el valor del coeficiente en función de ángulo del vertedero ( $C_d$ ).

**Tabla 65.**

*Coeficiente Cd para diversos ángulos de vertederos*

ÁNGULO $\theta$	Cd
15	0.75
30	0.72
45	0.69
60	0.54
90	0.60

**Nota.** Esta tabla muestra los coeficientes Cd para diferentes ángulos de vertederos. Tomado de: A. Melo P., J. S. Herrera D., *Diseño y construcción de una planta piloto para el tratamiento de agua potable en el laboratorio de la universidad católica de Colombia, tesis pre.* Facultad de Ingenierías, Universidad Católica de Colombia, Bogotá, Colombia 2016. [En línea]. Disponible:

<https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/14034/4/Proyecto%20de%20grado%20-%20Diseño%20y%20construcción%20de%20una%20PTAP.pdf>

De acuerdo a los datos establecidos, se procede a calcular la altura máxima de la lámina de agua en el vertedero con la ecuación 10. [37]

**Ecuación 10.** *Altura de la lámina de agua*

$$H = \left( \frac{Q}{\frac{8}{15} \cdot C_d \cdot \sqrt{2g} \cdot \tan \frac{\theta}{2}} \right)^{\frac{2}{5}}$$

Donde

$H$  = altura lámina de agua (m)

$Q$  = Caudal de diseño ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

$C_d$  = coeficiente en función del ángulo del vertedero

$g$  = gravedad ( $\text{m}/\text{s}^2$ )

$\theta$  = ángulo del vertedero

$$H = \left( \frac{14.19 \frac{L}{s} \cdot \frac{1 m^3}{1000 L}}{\frac{8}{15} \cdot 0.6 \cdot \sqrt{2 \left( 9.81 \frac{m}{s^2} \right) \cdot \tan \frac{90^\circ}{2}}} \right)^{\frac{2}{5}} = 0.16 m$$

Luego se determina la caída de agua del vertedero (P). [5]

**Ecuación 11.** *Caída de agua del vertedero*

$$P = 4.2 \cdot \left( q^{2/3} \right)$$

Donde

$P$  = Caída de agua (m)

$q$  = Caudal unitario ( $m^3/s \cdot m$ )

$$P = 4.2 \cdot \left( 0.059 \frac{m^3}{s \cdot m} \right)^{2/3} = 0.64 m$$

Se calcula el ancho del vertedero (B). [5]

**Ecuación 12.** *Ancho del vertedero*

$$B = \frac{Q}{q}$$

Donde

$B$  = Ancho del vertedero (m)

$Q$  = Caudal de diseño ( $m^3/s$ )

$q$  = Caudal unitario ( $m^3/s \cdot m$ )

$$B = \frac{14.19 \frac{L}{s} \cdot \frac{1 \text{ m}^3}{1000 L}}{0.059 \frac{\text{m}^3}{s \cdot m}} = 0.24 \text{ m}$$

De acuerdo a esto se determina la distancia donde se produce mayor turbulencia ( $L_m$ ).  
[5]

**Ecuación 13.** *Distancia del punto de mayor turbulencia*

$$L_m = 0.595 \cdot P$$

Donde

$L_m$  = Distancia en donde se produce el punto de mayor turbulencia (m)

$P$  = Caída de agua (m)

$$L_m = 0.595 \cdot 0.63 \text{ m} = 0.38 \text{ m}$$

Luego de realizar el método gráfico de Lozano-Rivas, se procede a utilizar las ecuaciones descritas por el método de Richter para determinar las dimensiones que se requieren para el vertedero. [5]

**Ecuación 14.** *Profundidad crítica de flujo*

$$h_c = \left( \frac{q^2}{g} \right)^{1/3}$$

Donde

$h_c$  = profundidad crítica (m)

$q$  = Caudal unitario ( $\text{m}^3/\text{s} \cdot \text{m}$ )

$g$  = gravedad ( $m/s^2$ )

$$h_c = \left( \frac{\left( 0.059 \frac{m^3}{s \cdot m} \right)^2}{9.81 \frac{m}{s^2}} \right)^{1/3} = 0.07 \text{ m}$$

**Ecuación 15.** Profundidad del agua en la sección de máxima turbulencia

$$h_1 = \frac{\sqrt{2} \cdot h_c}{1.06 \cdot \sqrt{\frac{P}{h_c} + 1.5}}$$

Donde

$h_1$  = profundidad en la sección de máxima turbulencia (m)

$P$  = Caída de agua (m)

$h_c$  = profundidad crítica (m)

$$h_1 = \frac{\sqrt{2} \cdot 0.07 \text{ m}}{1.06 \cdot \sqrt{\frac{0.63 \text{ m}}{0.07 \text{ m}} + 1.5}} = 0.029 \text{ m}$$

**Ecuación 16.** Profundidad después del resalto

$$h_2 = \frac{\sqrt{1 + (8F_1^2)} - 1}{2} \cdot h_1$$

Donde

$h_2$  = profundidad después del resalto (m)

$F_1$  = número de Froude

$h_1$  = profundidad en la sección de máxima turbulencia (m)

Para determinar la profundidad después del resalto, se establece un número de Froude de 5.3 descrito por el método gráfico de Lozano-Rivas para vertederos. [5]

$$h_2 = \frac{\sqrt{1 + [8 \cdot (5.3)^2]} - 1}{2} \cdot 0.029 \text{ m} = 0.204 \text{ m}$$

Luego de determinar las dimensiones del vertedero, se procede a calcular la pérdida de energía ocasionada por el mismo, para ello se determinan las velocidades en los puntos específicos calculados anteriormente ( $h_1$  y  $h_2$ ) mediante la ecuación 17. [5]

**Ecuación 17.** *Velocidad en la sección de máxima turbulencia*

$$V_1 = \frac{q}{h_1}$$

Donde

$V_1$  = Velocidad en la sección de máxima turbulencia (m/s)

$h_1$  = profundidad en la sección de máxima turbulencia (m)

$q$  = Caudal unitario ( $\text{m}^3/\text{s} \cdot \text{m}$ )

$$V_1 = \frac{0.059 \frac{\text{m}^3}{\text{s} \cdot \text{m}}}{0.029 \text{ m}} = 2.02 \text{ m/s}$$

**Ecuación 18.** *Velocidad en la sección después del resalto*

$$V_2 = \frac{q}{h_2}$$

Donde

$V_2$  = Velocidad en la sección después del resalto (m/s)

$h_2$  = profundidad después del resalto (m)

$q$  = Caudal unitario ( $m^3/s \cdot m$ )

$$V_2 = \frac{0.059 \frac{m^3}{s \cdot m}}{0.204 m} = 0.29 m/s$$

**Ecuación 19.** *Pérdida de energía*

$$h = \frac{(h_2 - h_1)^3}{4 \cdot h_1 \cdot h_2}$$

Donde

$h$  = pérdida de energía (m)

$h_1$  = profundidad en la sección de máxima turbulencia (m)

$h_2$  = profundidad después del resalto (m)

$$h = \frac{(0.204 m - 0.029 m)^3}{4 \cdot 0.204 m \cdot 0.029 m} = 0.23 m$$

Teniendo en cuenta las alturas de máxima turbulencia y después del resalto en el vertedero, se determina la longitud de resalto que deberá tener el mismo junto con la velocidad, gradiente y tiempo de mezcla en dicho resalto mediante las siguientes ecuaciones. [5]

**Ecuación 20.** *Longitud de resalto*

$$L_j = 6 \cdot (h_2 - h_1)$$

Donde

$L_j$  = Longitud de resalto (m)

$h_1$  = profundidad en la sección de máxima turbulencia (m)

$h_2$  = profundidad después del resalto (m)



$$L_j = 6 \cdot (0.204 \text{ m} - 0.029 \text{ m}) = 1.05 \text{ m}$$

**Ecuación 21.** *Velocidad media de resalto*

$$V_m = \frac{V_1 + V_2}{2}$$

Donde

$V_m$  = velocidad media de resalto (m/s)

$V_1$  = Velocidad en la sección de máxima turbulencia (m/s)

$V_2$  = Velocidad en la sección después del resalto (m/s)

$$V_m = \frac{2.02 \frac{\text{m}}{\text{s}} + 0.29 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{2} = 1.15 \text{ m/s}$$

**Ecuación 22.** *Tiempo de mezcla*

$$t = \frac{L_j}{V_m}$$

Donde

$t$  = tiempo de mezcla (s)

$L_j$  = Longitud de resalto (m)

$V_m$  = velocidad media de resalto (m/s)

$$t = \frac{1.05 \text{ m}}{1.15 \text{ m/s}} = 0.91 \text{ s}$$

**Ecuación 23. Gradiente de mezcla**

$$G = \sqrt{\frac{\gamma \cdot h}{\mu \cdot t}}$$

Donde

$G$  = gradiente de mezcla ( $s^{-1}$ )

$\gamma$  = peso específico del agua ( $N/m^3$ )

$\mu$  = viscosidad del agua ( $N \cdot s/m^2$ )

$h$  = pérdida de energía (m)

$t$  = tiempo de mezcla (s)

$$G = \sqrt{\frac{1000 \frac{kg}{m^3} \cdot 9.81 \frac{m}{s^2} \cdot 0.23 m}{1.61 \times 10^{-3} Pa \cdot s \cdot 0.91 s}} = 1228.84 s^{-1}$$

De acuerdo a las dimensiones calculadas, se evidencia un valor de tiempo y gradiente de mezcla dentro del rango establecido por el método gráfico de Lozano-Rivas, lo que conlleva a un resultado eficiente para el proceso de coagulación. [5]

El dimensionamiento del vertedero se puede apreciar de mejor manera en los

ANEXOS con sus respectivas cotas y vistas en 3D.

## **9.2. Tanque de dosificación**

De acuerdo con American Journal of Environmental Sciences, aguas con baja turbiedad (<10 NTU) tal como en el presente caso (2.8 NTU), la coagulación puede presentar problemas debido a la baja concentración de partículas estables, por lo cual a veces es necesario aumentar la turbiedad sintéticamente hasta 10 NTU para formar flóculos que sean más fáciles de sedimentar; esto se debe comprobar experimentalmente y en caso de ser necesario, para hacer el aumento de turbiedad se hacen mezclas con un agente no patógeno y seguro que permita el aumento hasta los 10 NTU. [38]

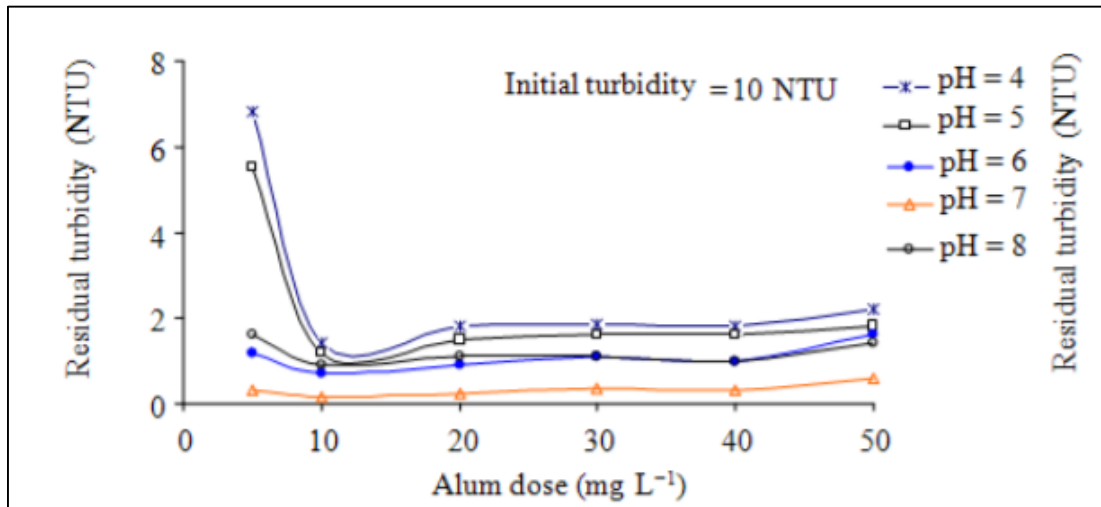
Además, en caso de que en alguna época del año aumente la turbiedad el sistema podrá cumplir con los requerimientos, para el proceso de coagulación.

Para el presente artículo se tomará la misma dosificación que si se tuviera 10 NTU. Teniendo en cuenta los resultados de American Journal of Environmental Sciences, [38] con un pH = 8 y 10 NTU corresponde una dosificación de 10 mg/L para lograr disminuir la turbiedad a menos de 2 NTU que exige la resolución 2115 de 2007. [2]

En la siguientes grafica se muestra el comportamiento de la turbiedad respecto a la dosificación de aluminio para una turbiedad inicial de 10 NTU a diferentes valores de pH

**Figura 14.**

*Dosis óptima de aluminio a distintos valores de pH*



**Nota.** Esta figura representa la dosis óptima de sulfato de aluminio para distintos valores de pH para una turbiedad inicial de 10 NTU. Tomado de: Baghvand, A., Zand, A. D., Mehrdadi, N. & Karbassi, A. (2010). Optimizing Coagulation Process for Low to High Turbidity Waters Using Aluminum and Iron Salts. *American Journal of Environmental Sciences*, 6(5), 442-448. <https://doi.org/10.3844/ajessp.2010.442.448>

Para agregar la dosis correcta a lo largo de la operación se hará uso de un sistema de dosificación con el cual se realizará una mezcla de coagulante, en un tanque aparte y se dosificará por goteo en el punto de mayor gradiente del vertedero; el tiempo de residencia de la mezcla coagulante al 1 %p/p a la cual se le llamará disolución madre, será de 2 horas, puesto que después de este tiempo el coagulante pierde eficiencia. [23]

Inicialmente se calcula la masa necesaria de coagulante.

**Ecuación 24.** Masa de coagulante requerido

$$m_c = Q \cdot D$$

Donde

$m_c$  = flujo másico del coagulante (mg/s)

$Q$  = caudal de diseño (L/s)

$D$  = dosis de coagulante (mg/L)

$$m_c = 14.09 \frac{L}{s} \cdot 10 \frac{mg}{L} = 140.9 \text{ mg/s}$$

A partir de este valor y el tiempo de operación de 8 h se obtiene la masa de coagulante necesaria para cada día de operación.

$$m_{sto} = 140.9 \frac{mg}{s} \cdot 8 \text{ h} \cdot \frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ h}} \cdot \frac{1 \text{ kg}}{1 \times 10^6 \text{ mg}} = 4.06 \text{ kg}$$

Para preparar la disolución de 1%p/p se toma la masa del soluto y se obtiene la masa de agua necesaria para obtener la concentración deseada.

**Ecuación 25.** *Concentración peso a peso de la disolución*

$$\% p/p = \frac{m_{sto}}{m_{sto} + m_w} \cdot 100\%$$

Donde

$m_w$  = masa de agua (kg)

$m_{sto}$  = masa de coagulante (kg)

$\%p/p$  = concentración peso a peso de la disolución (kg soluto/kg solución)

$$m_w = m_{sto} \cdot \left( \frac{100\%}{\%p/p} - 1 \right)$$

$$m_w = 4.06 \text{ kg} \cdot \left( \frac{100\%}{1\%} - 1 \right) = 401.94 \text{ kg}$$

Teniendo en cuenta que la operación es semicontinua y dura 8 horas para la operación es necesario producir la disolución madre 4 veces al día ya que la eficiencia de cada disolución solo se mantiene durante 2 horas, por lo cual se usaran 2 tanques cada uno con la capacidad de producir la disolución madre.

Para determinar la capacidad de cada tanque se usa la densidad para encontrar el volumen correspondiente a la masa de agua (401.94 Kg), obteniendo así que al día se necesitan 401.94 L de agua para hacer las disoluciones madre, este volumen se divide entre el número de disoluciones que deben realizarse y se obtiene el volumen para cada tanque.

**Ecuación 26. Número de disoluciones**

$$N^{\circ} \text{ disoluciones} = \frac{t_{op}}{t_{m\acute{a}x}}$$

$$N^{\circ} \text{ disoluciones} = \frac{8h}{2h} = 4 \text{ disoluciones}$$

**Ecuación 27. Volumen del tanque**

$$V_{tanque} = \frac{V_{total}}{N^{\circ} \text{ disoluciones}}$$

$$V_{tanque} = \frac{401.94 L}{4} = 100.5 L$$

Para la dosificación se usarán 2 tanque mientras uno se vacía se prepara la disolución madre en el otro así sucesivamente para cumplir con las 4 disoluciones. Además, esto se dosificará mediante un dosificador de diafragma.

**Ecuación 28. Longitud lado de tanque de dosificación**

$$l_{lado} = V_{tanque}^{1/3}$$

$$l_{lado} = \left( \frac{100.5l}{1000l} * 1m^3 \right)^{\frac{1}{3}} = 0.47m$$

Cada tanque será cuadrado y de 0.48 m lado teniendo en cuenta 10 cm de borde libre para poder preparar cada disolución.

### 9.3. Floculador hidráulico de flujo horizontal

El dimensionamiento del floculador hidráulico de flujo horizontal se presenta frente a los parámetros iniciales de velocidad promedio de flujo entre tabiques y el tiempo de retención hidráulica para dos zonas de la unidad con valores de 0.15 m/s y 10 min para la zona 1 y 0.1 m/s y 15 min para la zona 2, respectivamente, debido a los criterios de diseño que se plantean en la tabla 10. [5]

Luego se determina las dimensiones para cada zona del floculador mediante las siguientes expresiones, empleando fibra de vidrio como material de los tabiques: [5]

**Ecuación 29.** Longitud del canal de floculación

$$L = v \cdot t$$

Donde

$L$  = longitud del canal (m)

$v$  = velocidad media de flujo (m/s)

$t$  = tiempo de retención hidráulica (s)

$$L_1 = 0.15 \frac{m}{s} \cdot 10 \text{ min} \cdot \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}} = 90 \text{ m}$$

$$L_2 = 0.1 \frac{m}{s} \cdot 15 \text{ min} \cdot \frac{60 s}{1 \text{ min}} = 90 m$$

Se observa que la longitud calculada equivale al recorrido total realizado por el agua a través de todo el canal de cada zona de la unidad de floculación.

**Ecuación 30.** *Volumen de agua a mezclar*

$$V = Q \cdot t$$

Donde

$V$  = volumen ( $m^3$ )

$Q$  = caudal de diseño ( $m^3/s$ )

$t$  = tiempo de retención hidráulica (s)

$$V_1 = 14.19 \frac{L}{s} \cdot \frac{1 m^3}{1000 L} \cdot 10 \text{ min} \cdot \frac{60 s}{1 \text{ min}} = 8.51 m^3$$

$$V_2 = 14.19 \frac{L}{s} \cdot \frac{1 m^3}{1000 L} \cdot 15 \text{ min} \cdot \frac{60 s}{1 \text{ min}} = 12.77 m^3$$

**Ecuación 31.** *Área transversal requerida*

$$A = \frac{V}{L}$$

Donde

$A$  = área transversal ( $m^2$ )

$V$  = volumen ( $m^3$ )

$L$  = longitud del canal (m)

$$A_1 = \frac{8.51 m^3}{90 m} = 0.095 m^2$$



$$A_2 = \frac{12.77 \text{ m}^3}{90 \text{ m}} = 0.14 \text{ m}^2$$

**Ecuación 32.** *Profundidad de la lámina de agua*

$$d = L_b - bl$$

Donde

$d$  = profundidad de la lámina de agua (m)

$L_b$  = largo del tabique (m)

$bl$  = borde libre superior del tabique (m)

Las dimensiones que se toman para el tabique en ambas zonas son de largo 1.3 m y ancho 2.5 m, asumiendo un borde libre del tabique de 10 cm, con base a lo establecido en la bibliografía. [5]

$$d = 1.3 \text{ m} - 0.1 \text{ m} = 1.2 \text{ m}$$

**Ecuación 33.** *Separación entre tabiques*

$$s_b = \frac{A}{d}$$

Donde

$s_b$  = espacio entre tabiques o ancho de canales (m)

$A$  = área transversal (m<sup>2</sup>)

$d$  = profundidad de la lámina de agua (m)

$$s_{b_1} = \frac{0.095 \text{ m}^2}{1.2 \text{ m}} = 0.08 \text{ m}$$

$$s_{b_2} = \frac{0.14 \text{ m}^2}{1.2 \text{ m}} = 0.12 \text{ m}$$

**Ecuación 34.** *Profundidad del tanque*

$$H = d + bl$$

Donde

$H$  = profundidad del tanque (m)

$d$  = profundidad de la lámina de agua (m)

$bl$  = borde libre superior del tabique (m)

$$H = 1.2 \text{ m} + 0.1 \text{ m} = 1.3 \text{ m}$$

Para dimensionar las dos zonas del floculador es necesario permitir un borde libre, que dispone de 10 cm logrando una altura de 1.3 m, el cual se aproxima a 1.4 m, no obstante, en el diseño las láminas tendrán una altura útil de 1.3 m y las paredes de 1.4 m.

**Ecuación 35.** *Espacio libre entre tabique y la pared*

$$S_t = 1.5 \cdot s_b$$

Donde

$S_t$  = espacio libre (m)

$s_b$  = espacio entre tabiques o ancho de canales (m)

$$S_{t_1} = 1.5 \cdot 0.08 \text{ m} = 0.12 \text{ m}$$

$$S_{t_2} = 1.5 \cdot 0.12 \text{ m} = 0.18 \text{ m}$$

**Ecuación 36. Velocidad de giro**

$$V_g = \frac{Q}{d \cdot S_t}$$

Donde

$V_g$  = velocidad en el punto de giro (m/s)

$d$  = profundidad de la lámina de agua (m)

$S_t$  = espacio libre (m)

$$V_{g_1} = \frac{14.19 \frac{L}{s} \cdot \frac{1 m^3}{1000 L}}{1.2 m \cdot 0.12 m} = 0.1 m/s$$

$$V_{g_2} = \frac{14.19 \frac{L}{s} \cdot \frac{1 m^3}{1000 L}}{1.2 m \cdot 0.18 m} = 0.07 m/s$$

Debido a que las velocidades de giro obtenidas en las dos zonas no exceden los 0.15 m/s, se verifica que no se presenta una ruptura de flocs y cumplen los requerimientos para el diseño de la unidad. [5]

Con esto se permite determinar el número de tabiques y las dimensiones que deberá tener el floculador.

**Ecuación 37. Ancho útil del floculador**

$$B = a_b + S_t$$

Donde

$B$  = ancho del floculador (m)

$a_b$  = ancho del tabique (m)

$S_t$  = espacio libre (m)

$$B_1 = 2.5 \text{ m} + 0.12 \text{ m} = 2.62 \text{ m}$$

$$B_2 = 2.5 \text{ m} + 0.18 \text{ m} = 2.68 \text{ m}$$

**Ecuación 38.** *Número tramos de canal requeridos*

$$M = \frac{L}{B}$$

Donde

$M$  = número de tramos del canal

$L$  = longitud del canal (m)

$B$  = ancho del floculador (m)

$$M_1 = \frac{90 \text{ m}}{2.62 \text{ m}} = 34.35 \approx 35 \text{ canales}$$

$$M_2 = \frac{90 \text{ m}}{2.68 \text{ m}} = 33.58 \approx 34 \text{ canales}$$

**Ecuación 39.** *Número de tabiques requeridos*

$$N = M - 1$$

Donde

$N$  = número de tabiques

$M$  = número de tramos del canal

$$N_1 = 35 - 1 = 34$$

$$N_2 = 34 - 1 = 33$$

**Ecuación 40.** *Longitud total del floculador*

$$L_T = M \cdot s_b + N \cdot e$$

Donde

$L_T$  = longitud total de la unidad(m)

$e$  = espesor de tabiques (m)

$s_b$  = espacio entre tabiques o ancho de canales (m)

$N$  = número de canales

$M$  = número de tramos del canal

Se trabaja un espesor de 3 mm.

$$L_{T_1} = 35 \cdot 0.08 \text{ m} + 34 \cdot 0.003 \text{ m} = 2.90 \text{ m}$$

$$L_{T_2} = 34 \cdot 0.12 \text{ m} + 33 \cdot 0.003 \text{ m} = 4.18 \text{ m}$$

**Ecuación 41.** Pérdida por fricción en el tanque

$$h_1 = \left[ \frac{n \cdot v}{\left( \frac{A}{s_b + 2 \cdot B} \right)^{2/3}} \right]^2 \cdot L$$

Donde

$h_1$  = pérdida por fricción (m)

$n$  = coeficiente de rugosidad de Manning

$v$  = velocidad media de flujo (m/s)

$A$  = área transversal (m<sup>2</sup>)

$s_b$  = espacio entre tabiques o ancho de canales (m)

$B$  = ancho del floculador (m)

$L$  = longitud del canal (m)

De acuerdo a varios estudios de materiales que se utilizan como tabiques para el tanque de floculación, el cual establecen el promedio del coeficiente de rugosidad de Manning para distintos materiales y tipos de canal con un valor de 0.012, el cual se utilizará para este diseño y así estandarizar el material para que requiera un menor mantenimiento. [5]

$$h_{1_1} = \left[ \frac{0.012 \cdot 0.15 \text{ m/s}}{\left( \frac{0.095 \text{ m}^2}{0.08 \text{ m} + 2 \cdot 2.62 \text{ m}} \right)^{2/3}} \right]^2 \cdot 90 \text{ m} = 0.062 \text{ m}$$

$$h_{1_2} = \left[ \frac{0.012 \cdot 0.1 \text{ m/s}}{\left( \frac{0.14 \text{ m}^2}{0.12 \text{ m} + 2 \cdot 2.68 \text{ m}} \right)^{2/3}} \right]^2 \cdot 90 \text{ m} = 0.017 \text{ m}$$

**Ecuación 42.** *Pérdida adicional en el tanque*

$$h_2 = \frac{3 \cdot N \cdot v^2}{2g}$$

Donde

$h_2$  = pérdida adicional (m)

$N$  = número de canales

$v$  = velocidad media de flujo (m/s)

$g$  = gravedad (m/s<sup>2</sup>)

$$h_{2_1} = \frac{3 \cdot 34 \cdot \left(0.15 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{2 \cdot 9.81 \text{ m/s}^2} = 0.12 \text{ m}$$

$$h_{2_2} = \frac{3 \cdot 33 \cdot \left(0.1 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{2 \cdot 9.81 \text{ m/s}^2} = 0.051 \text{ m}$$

**Ecuación 43.** *Pérdida de carga total*

$$h = h_1 + h_2$$

Donde

$h$  = pérdida de carga total (m)

$h_1$  = pérdida por fricción (m)

$h_2 =$  pérdida adicional (m)

$$h_1 = 0.062 \text{ m} + 0.12 \text{ m} = 0.182 \text{ m}$$

$$h_2 = 0.017 \text{ m} + 0.051 \text{ m} = 0.068 \text{ m}$$

**Ecuación 44.** *Gradiente de velocidad*

$$G = \sqrt{\frac{g \cdot h}{\nu \cdot t}}$$

Donde

$G =$  gradiente de velocidad ( $s^{-1}$ )

$g =$  gravedad ( $m/s^2$ )

$\nu =$  viscosidad cinemática ( $m^2/s$ )

$h =$  pérdida de carga total (m)

$$G_1 = \sqrt{\frac{9.81 \frac{m}{s^2} \cdot 0.182 \text{ m}}{1.61 \times 10^{-6} \frac{m^2}{s} \cdot 10 \text{ min} \cdot \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}}}} = 42.99 \text{ s}^{-1}$$
$$G_2 = \sqrt{\frac{9.81 \frac{m}{s^2} \cdot 0.068 \text{ m}}{1.61 \times 10^{-6} \frac{m^2}{s} \cdot 15 \text{ min} \cdot \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}}}} = 21.46 \text{ s}^{-1}$$

**Ecuación 45.** *Número de Camp*

$$N_{Camp} = \sum G_i \cdot t_i$$

Donde

$N_{Camp}$  = número de Camp

$G_i$  = gradiente de mezcla de cada zona ( $s^{-1}$ )

$t_i$  = tiempo de mezcla de cada zona (s)

$$N_{Camp} = \left( 42.99 \text{ s}^{-1} \cdot 10 \text{ min} \cdot \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}} \right) + \left( 21.46 \text{ s}^{-1} \cdot 15 \text{ min} \cdot \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}} \right) = 45108$$

Se recomienda obtener números de Camp que se encuentren entre 20000 y 150000, lo cual este valor calculado cumple con el requisito de diseño. [5]

Por último, se determina el porcentaje de inclinación que deberá tener cada zona de la unidad de floculación.

**Ecuación 46. Pendiente del floculador**

$$S = \frac{h}{L_T}$$

Donde

$S$  = Porcentaje de inclinación

$h$  = pérdida de carga total (m)

$L_T$  = longitud total de la unidad (m)

$$S_1 = \frac{0.182 \text{ m}}{2.90 \text{ m}} = 0.0628 = 6.28\%$$

$$S_2 = \frac{0.068 \text{ m}}{4.18 \text{ m}} = 0.0163 = 1.63\%$$

De acuerdo a estos cálculos se dimensiona mediante la herramienta de AutoCAD, obteniendo en diferentes vistas y con su debida acotación la unidad de floculación, las cuales se presentan en los



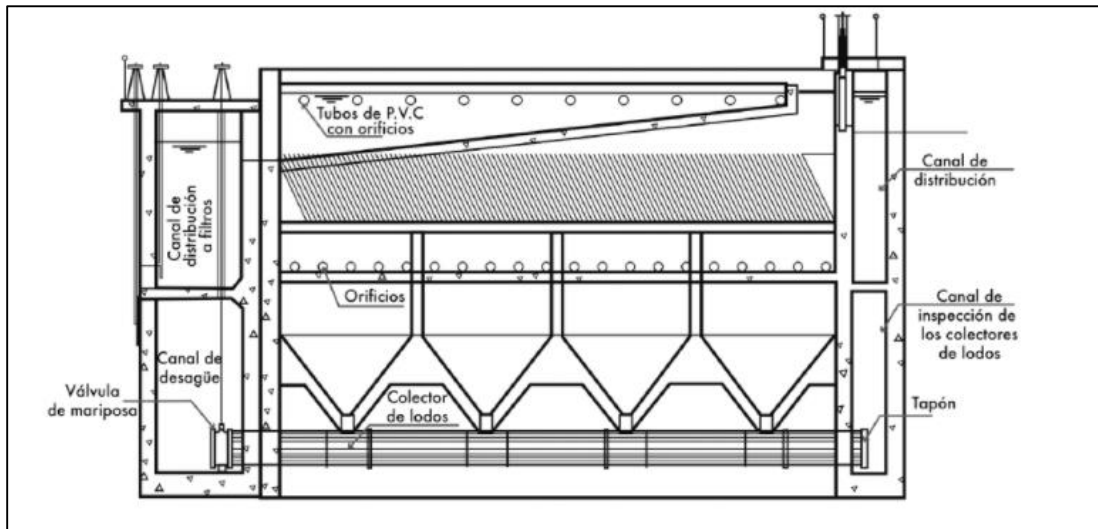
ANEXOS.

#### **9.4. Clarificador**

El clarificador se caracteriza por tener 4 zonas: la zona de entrada, la zona de sedimentación, la zona de lodos y la zona de salida; cada una con diferentes variables de diseño.

**Figura 15.**

*Esquema clarificador lamelar*



**Nota.** Esta figura representa el esquema de cada sección de un sedimentar lamelar. Tomado de: W. A. Lozano Rivas. (2015). *Potabilización del agua: principios de diseño, control de procesos y laboratorio: Diseño de sedimentadores*. (1ª edición), [En línea]. Disponible: <https://search-ebSCOhost-com.ezproxy.uamerica.edu.co/login.aspx?direct=true&db=nlebk&AN=1593375&lang=es&site=eds-live&scope=site>

El diseño del clarificador se diseñará de acuerdo a la guía de diseño de clarificadores lamelares propuesta en el libro de Lozano Rivas. [5] Donde el número mínimo de clarificadores para un sistema es de 2 para que en caso de que alguno este en mantenimiento el otro pueda continuar con el proceso; a partir de esto el caudal de diseño se divide entre el número de clarificadores.

**Ecuación 47.** *Caudal por unidad de sedimentación*

$$Q_{\text{unitario}} = \frac{Q}{N^{\circ} \text{ unidades}}$$

Donde

$Q_{unitario}$  = caudal por unidad de sedimentación (L/s)

$Q$  = caudal de diseño (L/s)

$N^{\circ}_{unidades}$  = número de clarificadores

$$Q_{unitario} = \frac{14.19 \text{ L/s}}{2} = 7.09 \text{ L/s}$$

Siguiendo la guía de diseño y tomando como carga superficial 150 m/d para flocs de alúmina como muestra el autor Romero cuadro 5.7 y un incremento del 0% sobre el área superficial. [5]

*Nota:* los valores de cargas superficiales deben ser comprobados de manera experimental.

#### **9.4.1. Zona de sedimentación**

Como punto de partida se toman placas de fibra de vidrio con un ancho de 2.4 m, 1.2 m de longitud y 9 mm de grosor. Las cuales tendrán una separación de 6 cm entre ellas y una inclinación de 60° con el objetivo de evitar que se acumule suciedad entre ellas y mejorar la eficiencia de sedimentación como se recomienda por Lozano-Rivas. [5]

A partir de lo anterior se calcula la longitud relativa.

#### **Ecuación 48. Longitud relativa**

$$L = \frac{l}{E}$$

Donde

$l$  = longitud de las placas (m)

$E$  = espaciamiento entre placas (m)

$$L = \frac{1.2 \text{ m}}{0.06 \text{ m}} = 20$$

A partir de la carga superficial y el caudal se calcula el área útil.

**Ecuación 49. Área útil**

$$A = \frac{Q}{CS}$$

Donde

$A$  = área útil ( $\text{m}^2$ )

$Q$  = Caudal de diseño ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

$CS$  = Carga superficial (m/d)

$$A = \frac{14.19 \frac{\text{L}}{\text{s}} \cdot \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ L}} \cdot \frac{86400 \text{ s}}{1 \text{ d}}}{150 \text{ m/d}} = 8.17 \text{ m}^2$$

Consecuentemente, se calcula la velocidad promedio de sedimentación.

**Ecuación 50. Velocidad promedio de sedimentación entre las placas**

$$V_o = \frac{CS}{\sin(\theta)}$$

Donde

$V_o$  = velocidad promedio de sedimentación entre placas (m/d)

$CS$  = carga superficial (m/d)

$\theta$  = ángulo de las placas

$$V_o = \frac{150 \text{ m/d}}{\sin(60^\circ)} = 173.21 \text{ m/d}$$

Con base en lo anterior se procede a calcular la velocidad critica de sedimentación, para lo cual es necesario calcular la longitud relativa en la zona de transición y la corregida de la siguiente manera.

**Ecuación 51.** *Longitud relativa en la zona de transición*

$$L' = 0.013 \cdot V_o \cdot \frac{E}{\nu}$$

Donde

$L'$  = longitud relativa zona de transición

$V_o$  = velocidad promedio de sedimentación entre placas (m/s)

$E$  = espaciamiento entre placas (m)

$\nu$  = viscosidad cinemática (m<sup>2</sup>/s)

$$L' = 0.013 \cdot \left( 173.21 \frac{\text{m}}{\text{d}} \cdot \frac{1 \text{ d}}{86400 \text{ s}} \right) \cdot \frac{0.06 \text{ m}}{1.14 \times 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}} = 1.37$$

Con este valor de  $L'$  se calcula la longitud relativa corregida.

**Ecuación 52.** *Longitud relativa corregida*

$$L_c = L - L'$$

Donde

$L_c$  = longitud relativa corregida

$L$  = longitud relativa

$L'$  = longitud relativa en la zona de transición

$$L_c = 20 - 1.37 = 18.63$$

Con base en esto se calcula la velocidad crítica de sedimentación.

**Ecuación 53.** *Velocidad crítica de sedimentación*

$$V_{sc} = \frac{S \cdot V_o}{\sin \theta + L_c \cdot \cos \theta}$$

Donde

$V_{sc}$  = velocidad crítica de sedimentación (m/d)

$S$  = constante adimensional (siendo 1 para placas paralelas inclinadas  $60^\circ$ )

$V_o$  = velocidad promedio de sedimentación entre placas (m/d)

$L_c$  = longitud relativa corregida

$\theta$  = ángulo de las placas

$$V_{sc} = \frac{1 \cdot 173.21 \text{ m/d}}{\sin 60^\circ + 18.63 \cdot \cos 60^\circ} = 17.01 \text{ m/d}$$

Este valor se encuentra por debajo del límite recomendado por el lozano Rivas (20 m/d) por lo cual es factible continuar. [5]

Seguido, se calcula el número de Reynolds asegurándose que se encuentre dentro el régimen recomendado (entre 100 y 500 y preferiblemente menor a 250). [5]

**Ecuación 54.** *Número de Reynolds*

$$Re = \frac{V_o \cdot E}{\nu}$$

Donde

$Re$  = número de Reynolds

$V_o$  = velocidad promedio de sedimentación entre placas (m/s)

$E$  = espaciamiento entre placas (m)

$\nu$  = viscosidad cinemática ( $m^2/s$ )

$$Re = \frac{173.21 \frac{m}{d} \cdot \frac{1 d}{86400 s} \cdot 0.06 m}{1.14 \times 10^{-6} \frac{m^2}{s}} = 105.6$$

Como los anteriores valores están dentro del rango recomendado se prosigue a calcular el tiempo de retención en las celdas.

**Ecuación 55.** *Tiempo de retención hidráulica en las celdas*

$$t_{celdas} = \frac{l}{V_o}$$

Donde

$t_{celdas}$  = tiempo de retención hidráulica en las celdas (min)

$l$  = longitud de las placas (m)

$V_o$  = velocidad promedio de sedimentación entre placas (m/min)

$$t_{celdas} = \frac{1.2 m}{173.21 \frac{m}{d} \cdot \frac{1 d}{1440 min}} = 10 min$$

Ahora asumiendo una altura de tanque igual 3.5 m se calcula el tiempo de retención en toda la unidad de sedimentación.

**Ecuación 56. Tiempo de retención hidráulica en la unidad**

$$t_{unidad} = \frac{\frac{A}{2} \cdot H}{Q_{unitario}}$$

Donde

$t_{unidad}$  = tiempo de retención hidráulica de la unidad (min)

$A$  = área útil ( $m^2$ )

$H$  = altura de la unidad (m)

$Q_{unitario}$  = caudal por unidad de sedimentación ( $m^3/\text{min}$ )

Se establece una altura de tanque de 3.5 m, debido a que los tanques de sedimentación suelen ser comúnmente entre 3 a 5 m de alto según el autor Lozano. [5]

$$t_{unidad} = \frac{\frac{8.17 \text{ m}^2}{2} \cdot 3.5 \text{ m}}{7.1 \frac{\text{L}}{\text{s}} \cdot \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ L}} \cdot \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}}} = 33.6 \text{ min}$$

Posteriormente se calcula el factor épsilon y el área superficial del clarificador. [7]

**Ecuación 57. Factor épsilon**

$$\varepsilon = \frac{e}{E + e}$$

Donde

$\varepsilon$  = factor épsilon

$e$  = espesor de placas (m)

$E$  = espaciamiento entre placas (m)



$$\varepsilon = \frac{9 \text{ mm} \cdot \frac{1 \text{ m}}{1000 \text{ mm}}}{0.06 \text{ m} + 9 \text{ mm} \cdot \frac{1 \text{ m}}{1000 \text{ mm}}} = 0.13$$

**Ecuación 58. Área superficial**

$$A_s = \frac{Q_{\text{unitario}}}{V_o \cdot \sin \theta \cdot (1 - \varepsilon)}$$

Donde

$A_s$  = área superficial ( $\text{m}^2$ )

$Q_{\text{unitario}}$  = caudal por unidad de sedimentación ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

$V_o$  = velocidad promedio de sedimentación entre placas ( $\text{m}/\text{s}$ )

$\varepsilon$  = factor épsilon

$\theta$  = ángulo de las placas

$$A_s = \frac{7.1 \frac{\text{L}}{\text{s}} \cdot \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ L}}}{173.21 \frac{\text{m}}{\text{d}} \cdot \frac{1 \text{ d}}{86400 \text{ s}} \cdot \sin 60^\circ \cdot (1 - 0.13)} = 4.7 \text{ m}^2$$

Seguido de calcular el área superficial, se determina la longitud del clarificador tomando un ancho útil igual al ancho de las placas (2.4 m). [7]

**Ecuación 59. Longitud del clarificador**

$$L_s = \frac{A_s}{B}$$

Donde

$L_s$  = longitud del clarificador (m)

$A_s$  = área superficial ( $\text{m}^2$ )

$B$  = ancho del clarificador (m)

$$L_s = \frac{4.7 \text{ m}^2}{2.4 \text{ m}} = 1.96 \text{ m}$$

Por último, se calcula el número de placas y la altura útil de la lámina de agua.

**Ecuación 60. Número de placas**

$$N = \frac{(L_s - l \cdot \cos \theta) \cdot \sin \theta + E}{E + e}$$

Donde

$N$  = número de placas

$L_s$  = longitud del clarificador (m)

$l$  = longitud de las placas (m)

$E$  = espaciamiento entre placas (m)

$e$  = espesor de placas (m)

$\theta$  = ángulo de las placas

$$N = \frac{(1.96 \text{ m} - 1.2 \text{ m} \cdot \cos 60^\circ) \cdot \sin 60^\circ + 0.06 \text{ m}}{0.06 \text{ m} + 9 \text{ mm} \cdot \frac{1 \text{ m}}{1000 \text{ mm}}} = 17.94 \approx 18 \text{ placas}$$

Con base en lo anterior se calcula el volumen de agua y la altura útil de agua en la unidad, obteniendo los siguientes resultados.

**Ecuación 61. Volumen del clarificador**

$$V_{sed} = Q_{unitario} \cdot t_{unidad}$$

Donde

$V_{sed}$  = volumen del clarificador (m<sup>3</sup>)

$Q_{unitario}$  = caudal por unidad de sedimentación (m<sup>3</sup>/s)

$t_{unidad}$  = tiempo de retención hidráulica de la unidad (s)

$$V_{sed} = 7.1 \frac{L}{s} \cdot \frac{1 m^3}{1000 L} \cdot 33.6 \text{ min} \cdot \frac{60 s}{1 \text{ min}} = 14.3 m^3$$

Con base en lo anterior se encuentra la altura útil de la lámina de agua en la unidad.

**Ecuación 62. Altura útil**

$$h_{agua} = \frac{V_{sed}}{A_s}$$

Donde

$h_{agua}$  = altura útil de la lámina de agua en el clarificador (m)

$V_{sed}$  = volumen del clarificador ( $m^3$ )

$A_s$  = área superficial ( $m^2$ )

$$h_{agua} = \frac{14.3 m^3}{4.7 m^2} = 3.04 m$$

Con esto se determina el espacio que debe tenerse debajo de las placas de la siguiente manera.

**Ecuación 63. Borde libre sobre la lámina de agua**

$$bl = H - h_{agua}$$

Donde

$bl$  = borde libre sobre la lámina de agua (m)

$H$  = altura de la unidad (m)

$h_{agua}$  = altura útil de la lámina de agua en el clarificador (m)

El cual se asume una altura total de 3.5 m

$$bl = 3.5 \text{ m} - 3.04 \text{ m} = 0.46 \text{ m}$$

#### **9.4.2. Zona de entrada**

Para este clarificador unitario se usará unas flautas ubicadas debajo de las láminas de tal forma que permitan llenar el clarificador de manera ascendente favoreciendo así un contraflujo entre el agua y los flóculos; desplazándose el agua hacia la parte superior y los flóculos hacia la parte inferior. Se ubicará una flauta por cada 1.2 m de ancho del clarificador dando así 2 flautas a través de las cuales se dividirá el flujo de manera uniforme entre las ambas flautas manejando así un flujo de 3.55 L/s cada una y se ubicaran a lo largo del clarificador. [5]

Es necesario determinar el diámetro de cada orificio y la velocidad a la que entrará el agua a la unidad. Donde, a través de un método de tanteo se identifica el diámetro y velocidad que permitan mantener un gradiente cercano a la última área de floculación ( $21.46 \text{ s}^{-1}$ ) evitando así que los flóculos se puedan llegar a romper.

#### **Ecuación 64. Gradiente velocidad**

$$G = \sqrt{\frac{0.03 \cdot \vartheta}{8 \cdot R \cdot \nu}}$$

Donde

$G$  = gradiente de velocidad ( $\text{s}^{-1}$ )

$\vartheta$  = velocidad (m/s)

$R$  = radio orificio (m), siendo para orificios circulares diámetro/4

$\nu$  = viscosidad cinemática ( $\text{m}^2/\text{s}$ )

**Tabla 66.**

*Gradientes de mezcla con respecto a diámetro de tubería y velocidad*

		DIÁMETRO (in)			
		1	1.5	2	3
VELOCIDAD (m/s)	0.1	22.77	18.59	16.10	13.15
	0.12	29.93	24.44	21.16	17.29
	0.14	37.71	30.80	26.68	21.77

**Nota.** Esta tabla muestra los gradientes de mezcla para cada diámetro y velocidad por tubería.

Mediante el método iterativo presentado en la Tabla 66 se selecciona un diámetro de 2 in (0.0508 m) y una velocidad de flujo a través de los orificios de 0.12 m/s, lo cual permite calcular el área interna de los orificios y el caudal por orificio.

**Ecuación 65.** Caudal por orificio

$$Q_{\text{orificio}} = A_{\text{orificio}} \cdot V_{\text{orificio}}$$

$$Q_{\text{orificio}} = \frac{\pi}{4} d^2 \cdot V_{\text{orificio}}$$

Donde

$Q_{\text{orificio}}$  = caudal correspondiente a cada orificio ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

$A_{\text{orificio}}$  = área transversal de flujo a través de los orificios ( $\text{m}^2$ )

$V_{\text{orificio}}$  = velocidad de flujo a través de los orificios (m/s)

$d$  = diámetro de orificio (m)

$$Q_{\text{orificio}} = \frac{\pi}{4} (0.0508 \text{ m})^2 \cdot 0.12 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 0.000243 \text{ m}^3/\text{s}$$

Seguido de esto, se calcula el número de orificios por flauta de la siguiente manera.

**Ecuación 66.** *Número de orificios en las flautas de alimentación*

$$n = \frac{Q_{flauta}}{Q_{orificio}}$$

Donde

$n$  = número de orificios por flauta

$Q_{flauta}$  = caudal por flauta ( $m^3/s$ )

$Q_{orificio}$  = caudal correspondiente a cada orificio ( $m^3/s$ )

$$n = \frac{3.55 \frac{L}{s} \cdot \frac{1 m^3}{1000 L}}{0.000243 m^3/s} = 14.61 \approx 15 \text{ orificios}$$

**Nota:** Los orificios de las flautas se orientarán hacia abajo para evitar que se taponen por las partículas que están siendo sedimentadas. [5]

Para calcular el diámetro interior de la tubería de reparto se usa la relación de Lozano-Rivas donde se toma el valor mínimo para del rango en el que debe oscilar esta relación. [5]

**Ecuación 67.** *Relación entre diámetros de orificio y flauta*

$$\left(\frac{d}{D}\right)^2 \cdot n = 2.6$$

$$D = \frac{d}{\left(\frac{2.6}{n}\right)^{1/2}}$$

Donde

$d$  = diámetro de orificios (m)

$D$  = diámetro tubería de reparto (m)

$n$  = número de orificios en la tubería de reparto

$$D = \frac{0.0508 \text{ m}}{\left(\frac{2.6}{15}\right)^{1/2}} = 0.12 \text{ m}$$

De acuerdo a este valor, se compara con catálogos de tuberías de acero, el cual se escoge el más cercano siendo una tubería nominal de 5 in de cédula 80.

**Nota:** las flautas se ubicarán 0.6 m por debajo de las placas. [5]

#### 9.4.3. Zona de lodos

La producción de lodos oscila entre 0.1% y 3% del caudal tratado por lo cual se toma como base de cálculo una producción una producción del 1 %. [5] Por lo tanto, para calcular el volumen de la zona de lodos se propone tiempo de operación entre cada drenado de lodos de 24 h, lo cual teniendo en cuenta que la operación dura 8 h por día sería cada 3 días.

#### Ecuación 68. Volumen de lodos

$$V_{\text{lodos}} = Q_{\text{unitario}} \cdot t_{\text{entre limpiezas}} \cdot \%_{\text{lodos}}$$

Donde

$Q_{\text{unitario}}$  = caudal por unidad de sedimentación (L/s)

$\%_{\text{lodos}}$  = porcentaje de volumen de caudal de entrada que corresponde a lodos

$t_{\text{entre limpiezas}}$  = tiempo de diferencia entre una limpieza y otra (h)

$$V_{\text{lodos}} = 7.1 \frac{\text{L}}{\text{s}} \cdot 24 \text{ h} \cdot \frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ h}} \cdot 1\% = 6130 \text{ L} = 6.13 \text{ m}^3$$

Seguido de esto se calcula el área y diámetro del orificio de descarga de lodos.

**Ecuación 69. Área del desagüe**

$$A_d = \frac{A_s \sqrt{h_{agua}}}{4850 \cdot t_{vaciado}}$$

Donde

$A_d$  = Área del orificio de desagüe ( $m^2$ )

$t$  = tiempo de vaciado (h)

$h_{agua}$  = altura útil de la lámina de agua en el clarificador (m)

$$A_d = \frac{\frac{4.7 m^2}{3} \sqrt{3.04 m}}{4850 \cdot 1 h} = 0.000564 m^2$$

Despejando el diámetro del área calculada, se obtiene la siguiente expresión.

**Ecuación 70. Diámetro de desagüe**

$$D_d = \sqrt{\frac{4 \cdot A_d}{\pi}}$$

Donde

$D_d$  = Diámetro de desagüe (m)

$A_d$  = Área del orificio de desagüe ( $m^2$ )

$$D_d = \sqrt{\frac{4 \cdot 0.000564 m^2}{\pi}} = 0.0268 m \approx 1.05 in$$

Se verifica que el diámetro es menor al diámetro mínimo establecido en la guía de diseño (6 in), por lo cual se toma el valor mínimo para el orificio de descarga. [5]



Los lodos generados en la unidad de sedimentación serán recolectados a través de una tolva de 45° de inclinación con la zona de descarga ubicada en el primer tercio de la longitud del clarificador como recomienda Lozano Rivas. [5]

**Ecuación 71. Ubicación de descarga**

$$\boxed{Ubicación\ descarga = \frac{L_s}{3}}$$

Donde

$L_s$  = longitud del clarificador (m)

$$Ubicación\ descarga = \frac{1.96\ m}{3} = 0.65\ m$$

**9.4.4. Zona de salida**

Para la zona de salida se escogió un sistema de flautas, las cuales se ubicarán por cada 1,2 m de ancho del clarificador, siendo necesario de la misma manera 2 flautas para el sistema de salida que se ubicarán a lo largo del clarificador.

Para evitar que estas trabajen ahogadas se diseñaran con el doble del caudal que fluirá a través de ellas es decir un 7.1 L/s como parámetro de diseño. Con este flujo se calcula el diámetro de la flauta.

**Ecuación 72. Diámetro de tubería de salida**

$$\boxed{D = Q^{0.4}}$$

Donde

$D$  = diámetro tubería salida (m)

$Q$  = caudal de diseño para la tubería (m<sup>3</sup>/s)

$$D = \left( 0.0071 \frac{m^3}{s} \right)^{0.4} = 0.138 m \approx 5.43 in$$

Por lo tanto, se escoge la tubería comercial que se asemeja al diámetro calculado siendo este de 6 in de cedula 120 con un diámetro interior de 139.8 mm, con base en este diámetro se calcula la distancia entre flautas. [39]

Consecuentemente se ubican las flautas a lo largo del clarificador con un distanciamiento igual a 0.28 m entre sus centros que es aproximadamente igual a 2 veces su diámetro. Seguido de calcular el diámetro de la tubería de salida se escoge un diámetro de 1/2 in para los orificios de salida como recomienda Lozano Rivas, para así calcular el número de orificios necesarios en cada flauta. [5]

**Ecuación 73.** *Relación diámetros y orificios*

$$\left( \frac{d}{D} \right)^2 \cdot n = 0.46$$

$$n = \frac{0.46}{\left( \frac{d}{D} \right)^2}$$

Donde

$n$  = número de orificios en la tubería de salida

$d$  = diámetro de los orificios (m)

$D$  = diámetro tubería salida (m)

$$n = \frac{0.46}{\left( \frac{0.0127 m}{0.1398 m} \right)^2} = 55.74 \approx 56 \text{ orificios}$$

A partir de esto se tiene en cuenta que son 2 flautas de recolección, donde cada una tendrá un total de 56 orificios, lo cual permite calcular la separación entre cada centro de cada orificio.

**Ecuación 74.** *Separación entre orificios*

$$\boxed{\textit{separación entre orificios} = \frac{L_s}{n}}$$

Donde

$L_s$  = longitud del clarificador (m)

$n$  = número de orificios en la tubería de salida

$$\textit{separación entre orificios} = \frac{1.96 \text{ m}}{56} = 0.35 \text{ m}$$

Finalmente, siguiendo la guía de diseño las flautas se ubicarán 10 cm por debajo de la altura útil de la lámina de agua y 10 cm por encima de las placas. [5]

Las vistas y acotaciones de la unidad se observan en los

ANEXOS.

### 9.5. Unidad de filtración rápida

La unidad de filtración rápida para este diseño se emplea como medio filtrante arena y grava, de acuerdo con esto se establecen las variables de diseño que permiten determinar el dimensionamiento del equipo respetando el rango de diseño, teniendo estas características:

- Tasa de filtración: 120 m/d
- Tiempo de lavado: 10 min
- Temperatura: 15°C
- Falsos fondos tipo Leopold

Debido a que se utilizarán falsos fondos tipo Leopold, se establecen las siguientes características del lecho de soporte recomendadas por el autor Romero. [7]

- Fondo: 5 cm de 1/2 in
- Segunda capa: 5 cm de 1/4 in
- Tercera capa: 5 cm de 1/8 in
- Cuarta capa: 5 cm de 1/16 in

Obteniendo una altura total para el lecho de soporte de 20 cm.

Luego se determina el número de unidades que se requieren con respecto al caudal de diseño.

**Ecuación 75. Número de filtros**

$$n = 0.044 \cdot Q^{\frac{1}{2}}$$

Donde

$n$  = número de unidades de filtración

$Q$  = caudal de diseño ( $m^3/d$ )

$$Q = 14.19 \frac{L}{s} \cdot \frac{1 m^3}{1000 L} \cdot \frac{3600 s}{1 h} \cdot \frac{24 h}{1 día} = 1226.02 m^3/d$$

$$n = 0.044 * \left( 12260.2 \frac{m^3}{d} \right)^{\frac{1}{2}} = 1.54 \approx 2 \text{ unidades de filtración}$$

Una vez determinado el número de unidades se procede a calcular el caudal unitario para cada una de ellas.

#### **Ecuación 76. Caudal unitario**

$$q = \frac{Q}{n}$$

Donde

$q$  = caudal unitario ( $m^3/d$ )

$n$  = número de unidades de filtración

$Q$  = caudal de diseño ( $m^3/d$ )

$$q = \frac{1226.02 m^3/d}{2} = 613.01 m^3/d$$

Teniendo en cuenta la tasa de filtración propuesta para lechos de arena, se determina el área superficial de la unidad.

**Ecuación 77. Área superficial total del filtro**

$$A_{TF} = \frac{Q}{C_s}$$

Donde

$A_{TF}$  = área superficial total ( $m^2$ )

$C_s$  = tasa de filtración ( $m/d$ )

$Q$  = caudal de diseño ( $m^3/d$ )

$$A_{TF} = \frac{1226.02 \text{ m}^3/d}{120 \text{ m/d}} = 10.22 \text{ m}^2$$

Seguido de esto se calcula el área de cada filtro.

**Ecuación 78. Área superficial requerida para cada filtro**

$$A_s = \frac{A_{TF}}{n}$$

Donde

$A_s$  = área superficial ( $m^2$ )

$A_{TF}$  = área superficial total ( $m^2$ )

$n$  = número de unidades de filtración

$$A_s = \frac{10.22 \text{ m}^2}{2} = 5.11 \text{ m}^2$$

Al haber determinado el área superficial, se procede a calcular la longitud y el ancho respectivo de cada unidad, teniendo en cuenta la siguiente relación.

**Ecuación 79. Relación Ancho - Largo de la unidad**

$$\frac{B}{L} = \frac{n+1}{2n}$$

Donde

$B$  = ancho de la unidad (m)

$L$  = largo de la unidad (m)

$n$  = número de filtros

$$\frac{B}{L} = \frac{2+1}{2 \cdot 2} = 0.75$$

$$B = 0.75L$$

$$A_s = B \cdot L$$

$$A_s = 0.75 \cdot L^2$$

**Ecuación 80. Largo de la unidad**

$$L = \sqrt{\frac{A_s}{0.75}}$$

Donde

$A_s$  = área de la unidad (m<sup>2</sup>)

$B$  = ancho de la unidad (m)

$L$  = largo de la unidad (m)

$$L = \sqrt{\frac{5.11 \text{ m}^2}{0.75}} = 2.61 \text{ m}$$

$$B = 0.75 \cdot 2.61 \text{ m} = 1.96 \text{ m}$$

Las características del lecho filtrante se observan en la Tabla 67.

**Tabla 67.**

*Características del lecho filtrante*

CARACTERÍSTICAS DEL LECHO FILTRANTE	
Arena sílice	Grano duro
Tamaño efectivo (TE) (mm)	0.8
Coefficiente de Uniformidad (CU)	1.5
Forma del grano	Redondeado
Porosidad inicial	0.45
Peso específico (g/cm <sup>3</sup> )	2.65
Tamaño de partículas (mm)	0.95

**Nota.** Esta tabla muestra las características del lecho filtrante para la unidad de filtración rápida de arena. Tomado de: J. A. Romero Rojas. (1999). *Potabilización del agua*. (3<sup>a</sup> edición) [En línea]. Disponible:

[https://www.academia.edu/43327791/Romero\\_Rojas\\_Jairo\\_Alberto\\_Potabilización\\_Del\\_Agua](https://www.academia.edu/43327791/Romero_Rojas_Jairo_Alberto_Potabilización_Del_Agua)



Con los datos calculados se emplea la altura total del filtro, describiendo las alturas del fondo, del lecho de arena y grava, de la lámina de agua sobre la arena y del borde libre, según lo establecido en los parámetros de diseño. [5] También se toman las alturas de los lechos:

$H_{FF}$  = altura del falso fondo = 0.27 m

$H_{grava}$  = altura lecho de grava = 0.35 m

$H_{arena}$  = altura lecho de arena = 0.75 m

$H_{agua}$  = lámina de agua sobre la arena = 2 m

$H_{bl}$  = Borde libre = 0.15 m

Obteniendo una altura total para el filtro de 3.52 m.

Para la descripción de los falsos fondos, se establecen las siguientes dimensiones según las dimensiones de la unidad de filtración:

- Ancho: 20 cm
- Alto: 27 cm
- Largo: 130 cm

Normalmente los falsos fondos están conformados por 10 módulos de ancho y 2 módulos de largo, con un total de 20 módulos. Con esto se obtiene un ancho de 2 m y un largo de 2.6 m para el falso fondo, siendo el mismo frente a las dimensiones de la unidad calculadas anteriormente. [5]

Luego se determina la velocidad de filtración que deberá trabajar la unidad con respecto a los falsos fondos establecidos.

**Ecuación 81. Tasa real de filtración**

$$V = \frac{Q/n}{L_{FF} \cdot a_{FF}}$$

Donde

$V$  = tasa de filtración (m/d)

$Q$  = caudal de diseño ( $m^3/d$ )

$L_{FF}$  = largo del falso fondo (m)

$a_{FF}$  = ancho del falso fondo (m)

$$V = \frac{\frac{1226.02 \text{ m}^3/d}{2 \text{ filtros}}}{2 \text{ m} \cdot 2.6 \text{ m}} = 117.89 \text{ m/d}$$

De acuerdo a lo anterior, para el análisis de la hidráulica de retro lavado, se procede a determinar la velocidad de arrastre de la unidad de filtración para arena como medio filtrante.

**Ecuación 82. Velocidad de arrastre**

$$V_s = 10 \cdot D_{60}$$

Donde

$V_s$  = velocidad de arrastre (m/min)

**Ecuación 83. Diámetro de partícula**

$$D_{60} = TE \cdot CU$$

Donde

$D_{60}$  = diámetro de partícula (mm)

$TE$  = tamaño efectivo (mm)

$CU$  = coeficiente de uniformidad

$$V_s = 10 \cdot 0.8 \cdot 1.5 = 12 \text{ m/min}$$

La limpieza de un medio granular durante el lavado, es el resultado del esfuerzo cortante producido por el agua de lavado y la abrasión resultante del contacto entre las partículas del lecho fluidizado, además de que la abrasión máxima ocurre cuando la velocidad de lavado es igual al 10% de la velocidad de arrastre, obteniendo una velocidad de lavado de la siguiente manera.

**Ecuación 84.** *Velocidad de lavado*

$$V_b = 0.1 \cdot V_s$$

Donde

$V_b$  = velocidad de lavado (m/min)

$$V_b = 0.1 \cdot 12 \frac{\text{m}}{\text{min}} = 1.2 \text{ m/min}$$

Esta velocidad calculada se establece para una temperatura de 20°C, lo cual se requiere de una corrección de este valor frente a la temperatura de trabajo de 15°C.

**Ecuación 85.** *Corrección velocidad de lavado*

$$V_{b(15^\circ\text{C})} = \frac{V_{b(20^\circ\text{C})}}{10 \cdot [\mu_{(15^\circ\text{C})}]^{1/3}}$$

Donde

$V_{b(15^\circ\text{C})}$  = Velocidad de lavado a 15°C (m/min)

$V_{b(20^\circ\text{C})}$  = velocidad de lavado a 20°C (m/min)

$\mu_{(15^\circ\text{C})}$  = viscosidad dinámica a 15°C (Pa\*s)

$$V_b (15^\circ C) = \frac{1.2 \text{ m/min}}{10 \cdot [1.14 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}]^{1/3}} = 1.15 \text{ m/min}$$

**Ecuación 86.** Porosidad expandida de la arena

$$\varepsilon_P = \left( \frac{V_b}{V_s} \right)^{0.22}$$

Donde

$\varepsilon_p$  = porosidad expandida de arena

$$\varepsilon_P = \left( \frac{1.15 \text{ m/min}}{12 \text{ m/min}} \right)^{0.22} = 0.5969 = 59.69\%$$

**Ecuación 87.** Altura del lecho expandido

$$H_{LE} = H_{arena} \cdot \left( \frac{1 - \varepsilon_i}{1 - \varepsilon_P} \right)$$

Donde

$H_{LE}$  = altura del lecho expandido (m)

$\varepsilon_i$  = porosidad inicial de arena

$\varepsilon_p$  = porosidad expandida de arena

$$H_{LE} = 0.75 \cdot \left( \frac{1 - 0.45}{1 - 0.5969} \right) = 1.023 \text{ m}$$

**Ecuación 88.** Caudal de lavado

$$Q_L = A_s \cdot V_b$$

Donde

$Q_L$  = caudal de lavado ( $m^3/min$ )

$$Q_L = 5.11 m^2 \cdot 1.15 \frac{m}{min} = 5.88 m^3/min$$

**Ecuación 89.** *Volumen total de agua de lavado por filtro*

$$V_L = Q_L \cdot t_L$$

Donde

$V_L$  = volumen de agua de lavado por filtro ( $m^3$ )

$Q_L$  = caudal de lavado ( $m^3/min$ )

$t_L$  = tiempo de lavado (min)

$$V_L = 5.88 \frac{m^3}{min} \cdot 10min = 58.8 m^3$$

**Ecuación 90.** *Volumen total de agua de lavado*

$$V_{Ltotal} = n \cdot V_L$$

Donde

$V_{Ltotal}$  = volumen total de agua de lavado ( $m^3$ )

$n$  = número de filtros

$V_L$  = volumen de agua de lavado por filtro ( $m^3$ )

$$V_{Ltotal} = 2 \cdot 58.8 m^3 = 117.6 m^3$$

Para el agua de lavado se requiere una canaleta de recolección para dicha agua, el cual se procede a calcular las dimensiones del mismo de la siguiente manera.

De acuerdo al autor Arboleda, se establece un ancho de canaleta de 0.3 m. [15]

**Ecuación 91. Altura útil de la canaleta**

$$h_o = \left( \frac{Q_L}{1.38 \cdot w} \right)^{2/3}$$

Donde

$h_o$  = altura útil (m)

$w$  = ancho de canaleta (m)

$Q_L$  = caudal de lavado ( $m^3/s$ )

$$h_o = \left( \frac{5.88 \frac{m^3}{min} \cdot \frac{1 min}{60 s}}{1.38 \cdot 0.3} \right)^{2/3} = 0.38 m$$

**Ecuación 92. Altura total de la canaleta**

$$H_e = 1.3 \cdot h_o + e$$

Donde

$H_e$  = altura de la canaleta (m)

$e$  = espesor de losa de fondo (m)

Se asume un espesor de losa de fondo de la canaleta de 0.05 m. [33]

$$H_e = 1.3 \cdot 0.39 m + 0.05 m = 0.56 m$$

**Ecuación 93.** Nivel del borde de la canaleta de recolección de lavado

$$N_{CL} = H_{FF} + H_e + H_{LE} + H_{grava}$$

Donde

$N_{CL}$  = nivel del borde de canaleta de lavado (m)

$$N_{CL} = 0.27 \text{ m} + 0.56 \text{ m} + 1.023 \text{ m} + 0.35 \text{ m} = 2.2 \text{ m}$$

Las pérdidas de carga generadas durante el retrolavado se determinan de la siguiente manera:

**Ecuación 94.** Pérdida generada por el lecho filtrante

$$h_1 = H_{arena} \cdot (1 - e) \cdot (sg - 1)$$

Donde

$H_{arena}$  = altura del lecho filtrante (m)

$e$  = porosidad del lecho filtrante

$sg$  = gravedad específica del medio filtrante

$$h_1 = 0.75 \text{ m} \cdot (1 - 0.45) \cdot (2.65 - 1) = 0.68 \text{ m}$$

**Ecuación 95.** Pérdida generada por el falso fondo y el lecho de soporte

$$h_{3(\text{Leopold y Soporte})} = 1.19 \cdot V_b^2 - 0.009 \cdot V_b + 0.01$$

Donde

$h_{3(\text{Leopold y Soporte})}$  = pérdida de carga del falso fondo y el soporte (m)

$V_b$  = velocidad de lavado (m/min)

$$h_{3(\text{Leopold y Soporte})} = 1.19 \cdot \left(1.15 \frac{\text{m}}{\text{min}}\right)^2 - 0.009 \cdot 1.15 \frac{\text{m}}{\text{min}} + 0.01 = 1.57 \text{ m}$$

Por último, se determinan las pérdidas que se generan durante la filtración.

**Ecuación 96. Número de Reynolds**

$$Re = \frac{V \cdot d_p}{\nu}$$

Donde

$Re$  = número de Reynolds

$V$  = tasa de filtración (m/s)

$d_p$  = diámetro de partícula (m)

$\nu$  = viscosidad cinemática (m<sup>2</sup>/s)

$$Re = \frac{117.89 \frac{m}{d} \cdot \frac{1 d}{86400 s} \cdot 0.95 mm \cdot \frac{1 m}{1000 mm}}{1.14 \times 10^{-6} m^2/s} = 1.14$$

**Ecuación 97. Coeficiente de arrastre**

$$C_D = \frac{24}{Re} + \frac{3}{\sqrt{Re}} + 0.34$$

Donde

$C_D$  = coeficiente de arrastre

$Re$  = número de Reynolds

$$C_D = \frac{24}{1.14} + \frac{3}{\sqrt{1.14}} + 0.34 = 24.2$$



**Ecuación 98.** Pérdida de carga generada por el lecho filtrante

$$h = 1.067 \cdot C_D \cdot \frac{1}{e^4} \cdot \frac{H_{arena}}{d_p} \cdot \frac{V^2}{g}$$

Donde

$h$  = pérdida de carga (m)

$C_D$  = coeficiente de arrastre

$e$  = porosidad del lecho

$d_p$  = diámetro de partícula (m)

$H_{arena}$  = altura del lecho filtrante (m)

$V$  = tasa de filtración (m/s)

$g$  = gravedad (m/s<sup>2</sup>)

$$h = 1.067 \cdot 24.2 \cdot \frac{1}{(0.45)^4} \cdot \frac{0.75 \text{ m}}{0.95 \text{ mm} \cdot \frac{1 \text{ m}}{1000 \text{ mm}}} \cdot \frac{\left(117.89 \frac{\text{m}}{\text{d}} \cdot \frac{1 \text{ d}}{86400 \text{ s}}\right)^2}{9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 0.094 \text{ m}$$

**Ecuación 99.** Pérdida de carga generada por el medio de soporte

$$h_G = \frac{V \cdot H_{soporte}}{3}$$

Donde

$h_G$  = pérdida de carga del medio de soporte (m)

$V$  = tasa de filtración (m/min)

$H_{soporte}$  = altura del medio de soporte (m)

$$h_G = \frac{117.89 \frac{\text{m}}{\text{d}} \cdot \frac{1 \text{ d}}{1440 \text{ min}} \cdot 0.2 \text{ m}}{3} = 0.0055 \text{ m}$$

Para la pérdida generada por el falso fondo y el soporte, se determina de la misma manera que en la ecuación 94 pero utilizando la velocidad de filtración en vez de velocidad de lavado.

$$h_{3 (Leopold y Soporte)} = 1.19 \cdot \left( 117.89 \frac{m}{d} \cdot \frac{1 d}{1440 min} \right)^2 - 0.009 \cdot 117.89 \frac{m}{d} \cdot \frac{1 d}{1440 min} + 0.01 = 0.017 m$$

**Ecuación 100.** Pérdida generada por el falso fondo tipo Leopold

$$h_{falso fondo} = h_{3 (Leopold y Soporte)} - h_G$$

Donde

$h_{falso fondo}$  = pérdida de carga del falso fondo tipo Leopold (m)

$h_{3(Leopold y Soporte)}$  = pérdida de carga del falso fondo y el soporte (m)

$h_G$  = pérdida de carga del medio de soporte (m)

$$h_{falso fondo} = 0.017 m - 0.0055 m = 0.0115 m$$

Obteniendo una pérdida total ocasionada por el lecho filtrante y el falso fondo, junto con el medio de soporte, durante la filtración, de 0.11 m, aproximadamente 11 cm.

De acuerdo a esto se realizó la ilustración del dimensionamiento mediante el software AutoCAD para analizar de mejor forma las medidas anteriormente calculadas, diseño que se muestra en los

ANEXOS.

### **9.6. Unidad de desinfección**

Para la última unidad de tratamiento, siendo la más importante del sistema, debido a que se presenta microorganismos que no se han retenido en los procesos anteriores y los cuales tienen que ser eliminados para que el agua logre llegar a los parámetros establecidos por la normatividad y sea posible su consumo diario, mediante el uso de un desinfectante y se tenga un efecto de cloro residual que permita que el agua sea inocua desde el momento de salir del proceso de tratamiento hasta su posterior utilización o consumo.

El desinfectante seleccionado anteriormente es el hipoclorito de sodio, el cual presenta una concentración de cloro entre el 1 al 15% y viene de diversos tamaños en botellas o recipientes plásticos, debido a que es la solución más fácil de dosificar y de emplearse en el proceso, en especial al ser manipulado por personal poco calificado. [15]

Para obtener el cloro residual que requiere el agua al salir del proceso de tratamiento, se trabajará de manera teórica el número de coliformes totales de acuerdo a la muestra de la fuente de agua, de tal manera que se establezca un estándar de dosificación de cloro en el proceso, para establecer una mejor estimación de cloro residual se requiere de realizar la experimentación de varias muestras que salen del proceso de filtración y

verificar el número de coliformes totales que se presentan en ese momento, debido a que este proyecto está enfocado en la teoría, se estiman los valores suministrados por la fuente de agua de coliformes totales.

El agua para que sea inocua para su consumo, el número de microorganismos bacterianos finales puede ser de 0 UFC/100ml y en los peores casos puede ser de 1.8 UFC/100ml a la salida del sistema de potabilización, además se establece un tiempo de contacto con el desinfectante entre 15 a 30 min en la cámara de desinfección. [5]

De acuerdo a lo anterior, se procede a calcular el cloro residual necesario para cumplir con el requisito a la salida del efluente.

**Ecuación 101. Cloro residual**

$$\frac{N_t}{N_0} = \frac{1}{(1 + 0.23 \cdot C_t \cdot t)^3}$$

$$C_t = \frac{\left(\frac{N_0}{N_t}\right)^{1/3} - 1}{0.23 \cdot t}$$

Donde

$N_t$  = número de coliformes totales salientes de la unidad de desinfección (UFC/100ml)

$N_0$  = número de coliformes totales entrantes a la unidad de desinfección (UFC/100ml)

$C_t$  = concentración de cloro residual (mg/L)

$t$  = tiempo de contacto del agua con el desinfectante (min)

Para un tiempo de contacto de 30 min se obtiene lo siguiente

$$C_t = \frac{\left(\frac{23070}{1.8}\right)^{1/3} - 1}{0.23 \cdot 30} = 3.25 \text{ mg/L}$$

Obteniendo así el siguiente consumo anual

**Ecuación 102.** Consumo de hipoclorito anualmente

$$K = \frac{Q * t * C_t}{\delta}$$

Donde

$K$ =Consumo anual (ml)

$t$ =Tiempo de operación (s)

$C_t$ =Consumo específico(g/L)

$\delta$ = Densidad del hipoclorito de sodio promedio (g/ml) [27]

$$K = \frac{14.09 \frac{l}{s} * (8h * 365d * 3600) * 3.25 \frac{mg}{l} * \frac{1g}{1000mg}}{1.2 \frac{g}{ml}} = 401142 ml$$

Con el cloro residual calculado, se procede a determinar el tiempo de retención para los tramos que requiere la unidad de desinfección, el número de tramos dependerá de la cantidad de cloro residual al que se requiera llegar, según la Comisión Nacional del Agua, establecen que el valor de cloro residual aceptable está entre 0.2 y 1.5 mg/L para agua potable. [33] De acuerdo al valor obtenido anteriormente se plantean dos tramos en la cámara de desinfección.

Para ello se calcula el tiempo de retención hidráulico del primer tramo, el cual se ve afectado por los cortos circuitos con un factor (f) de 0.5. [15]

**Ecuación 103.** Tiempo de retención hidráulico del primer tramo

$$T_{RH_1} = f \cdot t$$

Donde

$T_{RH1}$  = tiempo de retención hidráulico (min)

$f$  = factor de afectación

$t$  = tiempo de contacto (min)

$$T_{RH1} = 0.5 \cdot 30 \text{ min} = 15 \text{ min}$$

Luego se determina las dimensiones del primer tramo.

**Ecuación 104.** *Volumen del primer tramo de la cámara de contacto*

$$V_1 = Q \cdot T_{RH1}$$

Donde

$V_1$  = volumen del primer tramo ( $m^3$ )

$Q$  = caudal de diseño ( $m^3/s$ )

$T_{RH1}$  = tiempo de retención hidráulico (s)

$$V_1 = 14.19 \frac{L}{s} \cdot \frac{1 m^3}{1000 L} \cdot 15 \text{ min} \cdot \frac{60 s}{1 \text{ min}} = 12.77 m^3$$

La altura de la cámara de contacto está en un rango de 1 a 4 m, la longitud de tener una relación de 1.5 respecto al ancho y se debe mantener el mismo ancho para toda la unidad de desinfección. [15]

**Ecuación 105.** *Longitud del primer tramo*

$$L_1 = 1.5 \cdot a$$

**Ecuación 106. Ancho de la unidad**

$$V_1 = L_1 \cdot a \cdot h$$

$$a = \left( \frac{V_1}{1.5 \cdot h} \right)^{1/2}$$

Donde

$V_1$  = volumen del primer tramo ( $m^3$ )

$L_1$  = longitud del primer tramo (m)

$a$  = ancho de la unidad (m)

$h$  = altura de la unidad (m)

Se asume una altura de 2 m.

$$a = \left( \frac{12.77 \text{ m}^3}{1.5 \cdot 2 \text{ m}} \right)^{1/2} = 2.06 \text{ m}$$

$$L_1 = 1.5 \cdot 2.06 \text{ m} = 3.09 \text{ m}$$

Para la segunda etapa de la cámara de desinfección se requiere llegar a un valor de cloro residual entre 0.5 y 1.5 mg/L, por lo que permita disminuir el cloro residual a un valor de 1 mg/L, además de tener en cuenta una prueba de tratabilidad que representa la tasa de consumo de agua a tratar siendo este un valor de  $k' = 0.06$ . [15]

**Ecuación 107. Tiempo de permanencia para el agua clorada**

$$t_p = -\frac{1}{k'} \cdot \ln \left( \frac{C}{C_t} \right)$$

Donde

$t_p$  = tiempo de permanencia (min)

$k'$  = constante de la prueba de tratabilidad

$C$  = concentración de cloro residual requerido (mg/L)

$C_t$  = concentración de cloro residual obtenido (mg/L)

$$t_p = -\frac{1}{0.06} \cdot \ln\left(\frac{1 \frac{mg}{L}}{3.25 \frac{mg}{L}}\right) = 19.64 \text{ min}$$

**Ecuación 108.** *Volumen de la segunda etapa*

$$V_2 = Q \cdot t_p$$

Donde

$V_2$  = volumen del segundo tramo ( $m^3$ )

$Q$  = caudal de diseño ( $m^3/s$ )

$t_p$  = tiempo de permanencia (s)

$$V_2 = 14.19 \frac{L}{s} \cdot \frac{1 m^3}{1000 L} \cdot 19.64 \text{ min} \cdot \frac{60 s}{1 \text{ min}} = 16.72 m^3$$

De acuerdo a este volumen obtenido, se determinan las dimensiones del segundo tramo.

**Ecuación 109.** *Longitud del segundo tramo*

$$V_2 = L_2 \cdot a \cdot h$$

$$L_2 = \frac{V_2}{a \cdot h}$$

Donde



$V_2$  = volumen del segundo tramo ( $m^3$ )

$L_2$  = longitud del segundo tramo (m)

$a$  = ancho de la unidad (m)

$h$  = altura de la unidad (m)

$$L_2 = \frac{16.72 \text{ m}^3}{2.06 \text{ m} \cdot 2 \text{ m}} = 4.06 \text{ m}$$

**Ecuación 110.** *Tiempo de retención hidráulica total de la unidad*

$$t_{total} = T_{HR1} + t_p$$

Donde

$t_{total}$  = tiempo de retención hidráulica total (min)

$T_{RH1}$  = tiempo de retención hidráulico (min)

$t_p$  = tiempo de permanencia (min)

$$t_{total} = 15 \text{ min} + 19.64 \text{ min} = 34.64 \text{ min}$$

Para efectos de mantenimiento de la unidad se proponen la construcción de 2 unidades que permitan la operación del sistema cuando una de las 2 unidades esté en mantenimiento, evitando así desabastecer a la comunidad.

### **9.6.1. Dosis de hipoclorito de sodio**

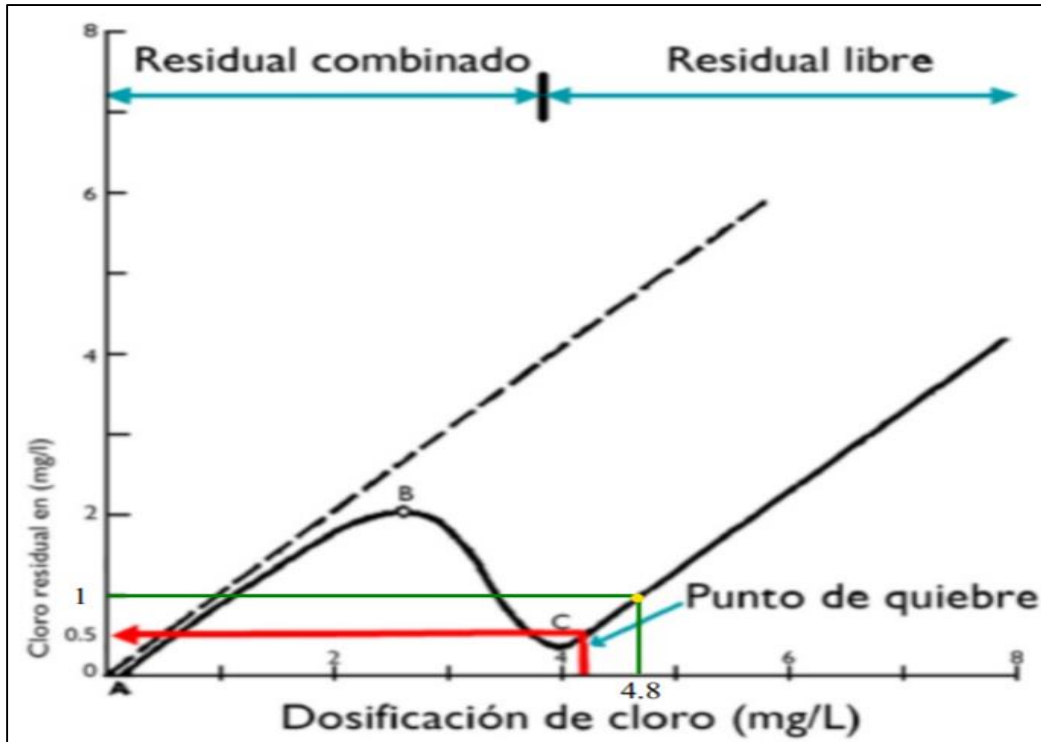
Para determinar la dosis necesaria para el proceso de desinfección, se debe tener en cuenta la concentración de cloro a utilizar, además de la concentración de cloro residual que se desea al final del tratamiento. Con esto, el desinfectante a utilizar debe tener una concentración del 15% en peso. [40]

De acuerdo a la presencia de componentes químicos en el agua tratada (Nitritos y Nitratos), la dosis de cloro necesaria para el proceso se establece como la demanda de cloro necesaria para eliminar todos los microorganismos más la concentración de cloro

que reacciona con dichas sustancias presentes, gracias a la figura que representa la curva de demanda de cloro.

**Figura 16.**

*Curva de cloro residual libre vs Dosificación de cloro*



**Nota.** Esta figura representa la curva de demanda de cloro para determinar la dosis necesaria de cloro en mg/L con respecto al cloro residual en mg/L. Tomado de: Manual para la cloración del agua en sistemas de abastecimiento de agua potable en ámbito rural: Fundamentos de la desinfección y cloración, PROAGUA II, Lima, Perú, 2017. [En línea]. Disponible:

[https://sswm.info/sites/default/files/reference\\_attachments/GIZ%202017.%20Manual%20para%20la%20cloración%20del%20agua%20en%20sistem as%20de%20abastecimiento%20de%20agua%20potable.pdf](https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/GIZ%202017.%20Manual%20para%20la%20cloración%20del%20agua%20en%20sistem as%20de%20abastecimiento%20de%20agua%20potable.pdf)

Con base a la figura 16, para una concentración de cloro residual de 1 mg/L, anteriormente calculado, se establece una dosis de cloro de 4.8 mg/L.

**Nota:** Esta dosis calculada hace enfoque desde lo teórico, para establecer la dosis adecuada para el proceso de desinfección se requiere de datos experimentales de laboratorio al inicio y final del proceso de desinfección para cumplir con la demanda de cloro necesaria para el agua tratada, con respecto a la cantidad de microorganismos y sustancias químicas que se presenten a lo largo de diferentes épocas de año.

### 9.7. Unidad de tanque de almacenamiento de agua potable

Para determinar el volumen del tanque de almacenamiento se toma el 15% del volumen del caudal tratado, con un tiempo de retención de 24 h.

**Ecuación 111.** *Volumen del tanque de almacenamiento*

$$V_{reservorio} = 0.15 \cdot Q \cdot t$$

Donde

$V_{almacenamiento}$  = volumen del tanque ( $m^3$ )

$Q$  = caudal de diseño ( $m^3/s$ )

$t$  = tiempo de almacenamiento (s)

$$V_{reservorio} = 0.15 \cdot 14.19 \frac{L}{s} \cdot 24 h \cdot \frac{3600 s}{1 h} \cdot \frac{1 m^3}{1000 L} = 184 m^3$$

Una vez calculado el volumen, se toma una altura de 3.5 m, con la cual se calcula el área del tanque.

**Ecuación 112.** *Área base del tanque de almacenamiento*

$$A = \frac{V_{almacenamiento}}{h}$$

Donde

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

$h = \text{altura del tanque (m)}$

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

$$A = \frac{184 \text{ m}^3}{3.5 \text{ m}} = 53 \text{ m}^2$$

Seguido de esto se calcula el diámetro del tanque correspondiente al área calculado.

**Ecuación 113.** *Diámetro del tanque de almacenamiento*

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot A}{\pi}}$$

Donde

$d = \text{diámetro del tanque (m)}$

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

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot 53 \text{ m}^2}{\pi}} = 8.21 \text{ m}$$

Donde tomando un borde libre de 0.5 m se diseña la estructura del tanque de almacenamiento cilíndrico.

La representación gráfica se muestra en el capítulo de

ANEXOS.

## 10. ANALISIS DE COSTOS

A continuación, se hace una estimación de la inversión inicial para poder implementar el sistema, así como los costos fijos anuales, los cuales hacen referencia a insumos, energía, mano de obra, mantenimiento y servicios necesarios para el correcto funcionamiento del sistema.

### 10.1. Costos de equipos

La inversión inicial consta principalmente de los costos de equipos y tecnologías necesarios para poner en marcha el sistema. Estos costos son los costos aproximados para los equipos sin contar mano de obra, instalación, transporte, entre otros otorgados por la empresa Pitltda.

**Tabla 68.**

*Costos estimados de equipos*

DESCRIPCIÓN	DIMENSIONES (LARGO O "GROSOR" X ANCHO X ALTO )(m)	CANTIDAD	COSTO UNITARIO (COP)	TOTAL (COP)
TANQUE VERTEDERO TRIANGULAR 90°	2,71 X 0,8X 1	1	\$ 1.200.000	\$ 1.200.000
DIVISIÓN VERTEDERO	0,02 X 0,8 X 0,55	1	\$ 250.000	\$ 250.000
VERTEDERO TRIANGULAR	0,02 X 0,8 X 86	1	\$ 630.000	\$ 630.000
TANQUE DOSIFICADOR	0,48 X 0,48 X 0,48	2	\$ 860.000	\$ 1.720.000
TANQUE FLOCULADOR ZONA 1	2,9 X 2,63 X 1,4	1	\$ 8.400.000	\$ 8.400.000
TABIQUES ZONA 1	0,003 X 2,63 X 1,4	35	\$ 50.000	\$ 1.750.000

DESCRIPCIÓN	DIMENSIONES (LARGO O "GROSOR" X ANCHO X ALTO )(m)	CANTIDAD	COSTO UNITARIO (COP)	TOTAL (COP)
TANQUE FLOCULADOR ZONA 2	4,18 X 2,69 X 1,4	1	\$ 9.000.000	\$ 9.000.000
TABIQUES ZONA 2	0,003 X 2,69 X 1,4	34	\$ 50.000	\$ 1.700.000
TANQUE CLARIFICADOR LAMELAR	1,99 X 2,4 X 3,5	1	\$ 700.000	\$ 700.000
PLACAS INCLINADAS	0,009 X 2,4 X 1,04	18	\$ 45.000	\$ 810.000
FLAUTAS ALIMENTACIÓN 4 1/2 "	1,99 largo	2	\$ 120.000	\$ 240.000
FLAUTAS DE SALIDA PERFORADAS 5 1/2 "	1,99 largo	2	\$ 130.000	\$ 260.000
TANQUE UNIDAD DE FILRACIÓN	2 X 2,6 X 3,52	2	\$ 2.600.000	\$ 5.200.000
LECHO DE ARENA(Kg)	3,9 m <sup>3</sup>	10413	\$ 560	\$ 5.831.280
LECHO DE GRAVA(kg)	1,82 m <sup>3</sup>	4732	\$ 476	\$ 2.252.432
FALSO FONDO TIPO LEOPOLD	1,30 X 0,20 X 0,27	2	\$ 420.000	\$ 840.000
TUBERIA DE ALIMENTACIÓN FILTRO 4 1/2 "	1 m largo	2	\$ 130.000	\$ 260.000
TUBERIA DE SALIDA FILTRO 4 1/2 "	1 m largo	1	\$ 120.000	\$ 120.000

DESCRIPCIÓN	DIMENSIONES (LARGO O "GROSOR" X ANCHO X ALTO )(m)	CANTIDAD	COSTO UNITARIO (COP)	TOTAL (COP)
TANQUE DE DESINFECCIÓN	7,15 X 2,8 X 2	2	\$ 1.200.000	\$ 2.400.000
TANQUE DE ALMACENAMIENTO	8,2 m diámetro 4m de alto	1	\$ 5.000.000	\$ 5.000.000
BOMBA FILTRACIÓN		1	\$ 4.900.000	\$ 4.900.000
			<b>TOTAL (COP)</b>	\$ 53.463.712

**Nota.** Esta tabla muestra los costos estimados de los equipos para el sistema de tratamiento establecido.

## 10.2. Costos fijos

Los costos que perduran al largo del tiempo de operación del se llaman costos fijos como los que se muestran a continuación:

### 10.2.1. Consumo de sulfato de aluminio

Con base en el consumo diario calculado en el numeral 9.2, se procede a calcular el consumo anual de sulfato de aluminio en kg. Donde tomando un costo promedio de varios proveedores de 3000 COP/kg, se obtienen los siguientes resultados. [41], [42], [43]

#### Ecuación 114. Costo anual de sulfato de aluminio

$$Canual_{AlSO_4} = m_{sto} * 365 * C_{kg}$$

Donde

$Canual_{AlSO_4}$  = Costo anual de sulfato de aluminio (COP)

$m_{sto}$  = Consumo de sulfato de aluminio (kg/d)

$C_{kg}$  = Precio kg sulfato de aluminio (COP)



$$Canual_{AlSO_4} = 4.06kg * 365 * 3000COP = 4'445'700 COP$$

### 10.2.2. Consumo de hipoclorito de sodio

A partir de la dosis aproximada calculada en el numeral 9.6 se calcula los costos anuales por consumo de hipoclorito de sodio. [44], [45]

#### Ecuación 115. Costo anual de Hipoclorito de sodio

$$Canual_{NaOCl} = K * C_{mlNaOCl}$$

Donde

$K$ = Consumo anual (ml)

$C_{mlNaOCl}$ = Costo de hipoclorito de sodio (COP/ml)

$$Canual_{NaOCl} = 401142 \frac{ml}{año} * 3 \frac{COP}{ml} = 1.203.427 COP$$

### 10.2.3. Agua de servicio

El agua de servicio es la necesaria para preparar las disoluciones madre por lo cual, de acuerdo con lo calculado anteriormente en el numeral 9.2 se procede a calcular los

#### Ecuación 116. Cálculo de costos agua servicios

$$Agua\ de\ servicio_{anual} = 0.402 \frac{m^3}{d} * 360d * 1215 \frac{COP}{m^3} = \$ 175.835$$

costos anuales de este servicio tomando un valor de 1215 COP/m<sup>3</sup>.

### 10.2.4. Mano de obra

Para el funcionamiento óptimo de sistema, así como el mantenimiento y limpieza de los equipos, se propone emplear a 2 técnicos en tratamiento de aguas y mantenimiento de unidades del sistema, para los cuales se estima un salario básico de 1'200000 COP con una jornada diurna en turnos rotativos, tomando así un valor promedio de 5000 COP/h para las jornadas de lunes a sábado y un recargo del 75% adicional para los domingos laborados como establece en el decreto 4108 de 2011, los cuales serán

desempeñados por un solo técnico, de acuerdo a eso se calculan los costos de mano de obra. [46]

**Ecuación 117. Costos de mano de obra**

$$\text{Costos mano de obra anual} = h_d * n * 30 * 12 * C_h$$

Donde

$h_d$  = horas de jornada laboral (h)

$n$  = # de trabajadores

$C_h$  = Valor de hora trabajada de lunes a sábado

$$\text{Costos mano de obra mensual} = 8 * 2 * 30 * 12 * 5000 = 28'800.000$$

Teniendo en cuenta un año con 52 domingos se calcula los costos por horas dominicales

**Ecuación 118. Costos por horas dominicales**

$$\text{Costos por dominicales} = h_d * n * d * C_h * 1.75$$

Donde

$h_d$  = horas de jornada laboral (h)

$n$  = # de trabajadores

$C_h$  = Valor de hora trabajada de lunes a sábado

$d$  = Numero de domingos en el año

$$\text{Costos por dominicales} = 8h * 1 * 52 * 5000\text{COP}/h * 1.75 = 364.000 \text{ COP}$$

Para concluir se hace un resumen de los costos fijos estimado para la operación del sistema.

**Tabla 69.***Costos fijos anuales de operación del sistema*

ITEM	CONSUMO ANUAL	COTOS UNITARIO (COP)	TOTAL, ANUAL (COP)
SULFATO DE ALUMINO ( kg)	1481,9	3000	\$ 4.445.700
HIPOCOLORITO DE SODIO 15%(ml)	401142	3	\$ 1.203.427
AGUA DE SERVICIO (m3)	145	1215	\$ 175.835
MANO DE OBRA (h)	5760	5000	\$ 28.800.000
MANO DE OBRA DOMINICAL (h)	416	8750	\$ 3.640.000
		<b>TOTAL</b>	\$ 38.264.962

**Nota.** Esta tabla muestra los costos fijos anuales de diferentes insumos requeridos para el sistema de tratamiento de agua potable.

## 11. CONCLUSIONES

El agua superficial de la quebrada Cicuedo, de la cual se abastece la comunidad actualmente, no cumple con la calidad para ser potable, ya que su turbiedad (2.8 NTU), el contenido de E. Coli (70 UFC/ml) y de coliformes totales (23000 UFC/ml) ya que se encuentran por fuera de los límites establecidos en la RAS 200 y resolución 2115 de 2007, obteniendo así un %IRCA del 55%, lo cual se requiere de un sistema de tratamiento de agua potable para satisfacer la demanda de agua para consumo humano.

Mediante el uso de matrices de selección se establecieron las etapas de tratamiento del agua que son coagulación mediante vertedero triangular, para el cual se calculó una dosificación del coagulante de 10 ppm de sulfato de aluminio ( $Al_2(SO_4)_3$ ) al 1%p/p para el caudal tratado; seguido de una unidad de floculación hidráulica, donde se formaran los Flocs a precipitar en la siguiente etapa de clarificación, desde la cual se planteó una etapa de filtración por gravedad, para finalizar se tuvo en cuenta una etapa de desinfección por hipoclorito de sodio al 15% en peso con una dosificación aproximada de 4.8 ppm del caudal a tratar con respecto a la demanda de cloro.

Para asegurar tratar los 14.19 L/s equivalentes a 406 m<sup>3</sup>/día para una operación semi continua de 8 h diarias, se establece una unidad vertedero triangular de 90°, 2 unidades de floculación hidráulica con tabiques, 2 unidades de clarificación por clarificador lamelar, 2 unidades de filtración por gravedad, 2 unidades de desinfección y un tanque de almacenamiento, que permitirán la correcta operación durante cualquier mantenimiento.

Se realizó un análisis de costos, donde los costos de inversión inicial aproximados para poner en puesta en marcha el sistema son de 53.463.712 COP, de igual forma los costos fijos anuales de insumos como son químicos para la coagulación, desinfección, junto con los costos de mano de obra aproximados y costos de servicios da un total de 38.264.962 COP.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Ministerio de Desarrollo Económico, “RAS 2000, Título A - Aspectos generales de los sistemas de agua potable y saneamiento básico. Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio Colombia,” *Reglam. Técnico Del Sect. Agua Potable Y Saneam. Basico*, p. 114, 2000.
- [2] Ministros de la protección social y de ambiente vivienda y desarrollo territorial, “Resolución Número 2115 de 2007,” *Minist. la Protección Soc. Minist. Ambient. Vivienda y Desarro. Territ.*, p. 23, 2007, [En línea]. Disponible: [http://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/normativa/Res\\_2115\\_de\\_2007.pdf](http://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/normativa/Res_2115_de_2007.pdf).
- [3] FAO, “Water Scarcity | Land & Water | Food and Agriculture Organization of the United Nations | Land & Water | Food and Agriculture Organization of the United Nations,” 2022. <https://www.fao.org/land-water/water/water-scarcity/en/>
- [4] DANE, “Grupos étnicos información técnica,” 2018. <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/grupos-etnicos/informacion-tecnica>
- [5] W. A. Lozano-Rivas and G. Lozano Bravo, *Potabilización del agua : principios de diseño, control de procesos y laboratorios*, 1a ed. Bogotá, 2015.
- [6] ACOUA TECNOLOGIA, “Filtración De Agua - Acqua Tecnologia,” 2022. <http://acquatecnologiaperu.com/works/filtracion-de-agua#>
- [7] J. A. Romero Rojas, *Potabilización del agua*, 3a edición. 1999.
- [8] J. Arboleda, *Teoría y práctica de la purificación del agua - Tomo 2*. 2000.
- [9] H. A. Restrepo Osorno, “Evaluación del proceso de Coagulación - Flocculación de una planta de tratamiento de agua potable,” Universidad Nacional de Colombia, 2009.
- [10] J. Arboleda, *Teoría y práctica de la purificación del agua - Tomo 1*. 2000.
- [11] METTLER TOLEDO, “Flocculación | Teoría y experiencias.” [https://www.mt.com/mx/es/home/applications/L1\\_AutoChem\\_Applications/L2\\_ParticleProcessing/Formulation\\_Flocculation.html](https://www.mt.com/mx/es/home/applications/L1_AutoChem_Applications/L2_ParticleProcessing/Formulation_Flocculation.html)
- [12] “¿Qué es la turbidez? | HANNA® instruments México,” Mar. 29, 2019.

- <https://hannainst.com.mx/boletines/que-es-la-turbidez/>
- [13] Gimeno, “Los nitratos - Facsa.” <https://www.facsa.com/los-nitratos/>
- [14] GOVERN ILLES BALEARS, “Salud ambiental-Sulfatos.” <https://www.caib.es/sites/salutambiental/es/sulfats-26202/>
- [15] S. de M. A. y R. Naturales and C. N. del Agua, *Volumen 4: Datos básicos para proyectos de agua potable y alcantarillado*. Coyocán, México, 2016.
- [16] Congreso de Colombia, “Ley 99 De 1993,” *D. Of.*, no. 41146, p. 44, 1993, [En línea]. Disponible:  
[https://www.redjurista.com/Documents/ley\\_99\\_de\\_1993\\_congreso\\_de\\_la\\_republica.aspx#/](https://www.redjurista.com/Documents/ley_99_de_1993_congreso_de_la_republica.aspx#/).
- [17] Colombia Ministerio de la Protección Social, “Decreto 1575 de 2007,” *D. Of.*, vol. 1, p. 9, 2007, [En línea]. Disponible:  
[https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma\\_pdf.php?i=30007](https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma_pdf.php?i=30007).
- [18] Ministerio de agricultura, “Decreto 1594 de 1984,” *Ley 9 1979 - Ley 2811 1974*, vol. 1984, no. Junio 26, p. 55, 1984, [En línea]. Disponible:  
[http://www.fedepanela.org.co/files/DECRETO\\_1594\\_DE\\_1984.pdf](http://www.fedepanela.org.co/files/DECRETO_1594_DE_1984.pdf).
- [19] A. G. Parra, “Análisis del Decreto 3930 del 25 de octubre de 2010,” *D. Of. Cornare*, vol. 47873, p. 25, 2010, [En línea]. Disponible:  
[http://www.ceo.org.co/images/stories/CEO/ambiental/documentos/Memorias/decreto\\_3930\\_de\\_2010-vertimientos\\_2dic2010.pdf](http://www.ceo.org.co/images/stories/CEO/ambiental/documentos/Memorias/decreto_3930_de_2010-vertimientos_2dic2010.pdf).
- [20] Presidente de la República, “Decreto 1541 de 1978,” pp. 1–34, 1981, [En línea]. Disponible:  
<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=1250>.
- [21] Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, “Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico - Título C,” *Minist. Ambient. Vivienda y Desarro. Territ.*, p. 336, 2010, [En línea]. Disponible:  
<https://www.minvivienda.gov.co/sites/default/files/documentos/titulo-c-dic-4-2013.pdf>.
- [22] Ingenio Empresa, “Cómo hacer una matriz de priorización + Modelo en Excel,” 2022. <https://www.ingenioempresa.com/matriz-de-priorizacion/>
- [23] A. S. Greville, “How to Select a Chemical Coagulant and Flocculant,” *Alberta Water*

- Wastewater Oper. Assoc.*, p. 24, 1997, [En línea]. Disponible: [https://sswm.info/sites/default/files/reference\\_attachments/GREVILLE\\_1997\\_How\\_to\\_Select\\_a\\_Chemical\\_Coagulant\\_and\\_Flocculant.pdf](https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/GREVILLE_1997_How_to_Select_a_Chemical_Coagulant_and_Flocculant.pdf).
- [24] I. D. E. L. Producto, “Ficha técnica sulfato de aluminio,” pp. 6–10, 2012, [En línea]. Disponible: <http://poolstoremexico.com/wp-content/uploads/2017/01/SULFATO-DE-ALUMINIO.pdf>.
- [25] J. M. Jiménez Téran, “Manual para el diseño de sistemas de agua potable y alcantarillado sanitario,” Universidad Veracruzana, 2013.
- [26] Nalco Water Handbook, “Types of Sedimentation Clarifiers | McGraw-Hill Education - Access Engineering,” 2018. <https://www-accessengineeringlibrary-com.ezproxy.uamerica.edu.co/content/book/9781259860973/toc-chapter/chapter22/section/section16?implicit-login=true>.
- [27] Brinsa, “Ficha técnica NaClO Hipoclorito de Sodio Químicos,” p. 2, 2018, [En línea]. Disponible: <http://www.brinsaquimica.com.co/wp-content/uploads/2017/10/FT-Hipoclorito-de-Sodio.pdf>.
- [28] N. Oropeza García, “Lodos residuales : estabilización y manejo,” *Caos Concienc.*, vol. 1, no. figura 1, pp. 51–58, 2006, [En línea]. Disponible: [http://dci.uqroo.mx/RevistaCaos/2006\\_Vol\\_1/Num\\_1/NO\\_Vol\\_I\\_21-30\\_2006.pdf](http://dci.uqroo.mx/RevistaCaos/2006_Vol_1/Num_1/NO_Vol_I_21-30_2006.pdf).
- [29] American Water Chemicals, “Espesamiento de Lodos - American Water Chemicals, Inc.,” 2022. <https://www.membranechemicals.com/es/water-treatment/espesamiento-de-lodos/>.
- [30] Denali Water Solutions, “How Is DAF Sludge Put to Beneficial Use?” <https://www.denaliwater.com/news/posts/2020/august-2020/how-is-daf-sludge-put-to-beneficial-use/>.
- [31] Condorchem envitech, “Procesos y tecnologías para el tratamiento de lodos | Condorchem Envitech.” <https://condorchem.com/es/blog/tratamiento-de-lodos/>.
- [32] M. Ramírez, N. Rincón, I. Araujo, A. Díaz, and J. Mata, “Estabilización anaerobia mesófila y termofílica de lodos activados provenientes de la industria cervecera,” *Cienc. e Ing. Neogranadina*, vol. 20, no. 1, pp. 5–21, 2010, [En línea]. Disponible: [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0124-81702010000100001](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0124-81702010000100001).

- [33] V. K. Tyagi and S. L. Lo, “Energy and Resource Recovery From Sludge: Full-Scale Experiences,” *Environ. Mater. Waste Resour. Recover. Pollut. Prev.*, pp. 221–244, Jan. 2016, doi: 10.1016/B978-0-12-803837-6.00010-X.
- [34] “Sludge treatment - the anaerobic digestion process | Sludge Processing,” May 08, 2020. <https://www.sludgeprocessing.com/anaerobic-digestion/anaerobic-digestion-process/> (accessed Feb. 13, 2022).
- [35] “Neutralac: Effluent treatment - Sludge treatment: Stabilization.” [https://www.neutralac.com/sludge\\_stabilisation.html](https://www.neutralac.com/sludge_stabilisation.html)
- [36] J. N. Rodríguez Torres, “Propuesta metodologica para tratamiento de lodos provenientes de plantas de potabilizacion en la sabana de bogotá (Estudio De Caso Madrid, Cundinamarca),” 2013.
- [37] R. D. Camacho Figueroa and M. F. Peña Bermejo, “Diseño de una planta de tratamiento de agua potable para la población de la playita, sitio nuevo magdalena.,” Universidad de la Costa, 2018.
- [38] A. Baghvand, A. D. Zand, N. Mehrdadi, and A. Karbassi, “Optimizing coagulation process for low to high turbidity waters using aluminum and iron salts,” *Am. J. Environ. Sci.*, vol. 6, no. 5, pp. 442–448, 2010, doi: <https://doi.org/10.3844/ajessp.2010.442.448>.
- [39] Tubos Monterrey, “PVC Hidráulico,” 2014, [En línea]. Disponible: <http://www.tubosmonterrey.com.mx/home/productos/tuberia/tuberia-de-pvc/pvc-hidraulico/>.
- [40] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales and Comisión Nacional del Agua, *Volumen 23: Desinfección para sistemas de agua potable y saneamiento*. Coyacán, México, 2016.
- [41] “Sulfato de Aluminio Tipo A x 25 Kg - Aquaintegral.” <https://aquaintegral.co/producto/sulfato-de-aluminio-tipo-a-x-25-kg-2/>
- [42] “KipClin SAS - Sulfato de Aluminio Tipo A PQP Profesional 25 Kg.” <https://www.kipclin.com/marca/pqp/sulfato-de-aluminio-tipo-a-pqp-profesional-25-kg.html>
- [43] “Sulfato de Aluminio Granulado Tipo A – Pantera – LATCOR.” [https://www.latcor.pe/producto/sulfato\\_aluminio\\_granulado\\_tipo\\_a/](https://www.latcor.pe/producto/sulfato_aluminio_granulado_tipo_a/)



- [44] “Hipoclorito de Sodio 15% x 24 Kg - Aquaintegral.”  
<https://aquaintegral.co/producto/hipoclorito-de-sodio-15-x-24-kg-3/>
- [45] “Hipoclorito de sodio al 15% garrafa por 20 litros.”  
<https://www.detercol.com/hipoclorito-de-sodio-al-15-garrafa-por-20-litros.html>
- [46] Presidencia de la República de Colombia, “Decreto 4108 de 2011,” *EVA - Gestor Norm.*, vol. 2011, no. 1, pp. 1–33, 2011, [En línea]. Disponible:  
[https://www.redjurista.com/Documents/decreto\\_4108\\_de\\_2011\\_dafp\\_-\\_departamento\\_administrativo\\_de\\_la\\_funcion\\_publica.aspx#/.](https://www.redjurista.com/Documents/decreto_4108_de_2011_dafp_-_departamento_administrativo_de_la_funcion_publica.aspx#/)

## **ANEXOS**

## ANEXO 1

# ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO DE LA QUEBRADA CICUEDO RESGUARDO EMBERA KATIO GITO DOKABÚ



Universidad  
Tecnológica  
de Pereira



VICERRECTORÍA DE INVESTIGACIONES  
INNOVACION Y EXTENSION  
LABORATORIO DE ANÁLISIS DE AGUAS Y ALIMENTOS  
INFORME DE ENSAYOS No 149/21

Código	123-LAA-F06
Versión	9
Fecha	2019-08-16
Página	1 de 3

Fecha Edición			Cotización Aprobada No.
AÑO	MES	DÍA	186/21
2021	02	17	

INFORMACIÓN DEL CLIENTE			
Razón Social:	<b>RESGUARDO INDIGENA EMBERA KATIO GITO DOKATU</b>	Nit o C.C.:	900279662-9
Solicitante:	Juan de Dios Queragama	Cargo:	Gobernador Cabildo
Dirección:	Corregimiento Santa Cecilia – Kemberde	Teléfono:	3146932364
Municipio/Departamento:	Pueblo Rico – Risaralda	Correo electrónico:	angela.montes25516@ucaldas.edu.co

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA					
Fecha de recepción: 2021-02-10					
Tipo de muestra	Descripción:	Fecha de toma de muestra	Hora de la toma	Tomadas por	Código interno
Agua Cruda	Punto de muestreo: Quebrada cicuedó Vereda: Kemberde corregimiento Santa Cecilia Risaralda Resguardo: Gito Dokabú Embrera Katio – Municipio de Pueblo Rico Coordenadas: 5:23:5, 26 80 – 76: 6 : 54,75 58 Temperatura: 21,3°C	2021-02-09	9:45 am	Ángela Montes	104-1

**OBSERVACIONES:** \*\*El resultado es un valor estimado de la concentración de nitratos.

RESULTADOS						
Fecha del ensayo	Ensayo	Método	Unidades	Código interno: 104-1		Rango permitido
				Resultado	Uexp	
2021-02-10	pH	SM: 4500-H <sup>+</sup> B. Método Electrométrico	UNIDADES	8,06 (21,3°C)	±0,01	N.E
	*Turbiedad	SM: 2130 B. Método Nefelométrico	NTU	2,80	± 0,22	N.E
	Color Aparente	SM: 2120 B. Método Comparación Visual	UND. Pt – Co	10	N.E	N.E
	*Alcalinidad Total	SM: 2320 B. Método Titulométrico	mg CaCO <sub>3</sub> /L	70	± 1,04	N.E
2021-02-15	*Dureza Total	SM: 2340 C. Método Titulométrico – EDTA	mg CaCO <sub>3</sub> / L	72	±0,43	N.E
	Dureza Cálctica	SM: 3500–Ca B. Método Titulométrico – EDTA	mg CaCO <sub>3</sub> / L	55	±0,34	N.E
2021-02-10	*Cloruros	SM: 4500–Cl <sup>-</sup> B. Método Argentométrico	mg Cl <sup>-</sup> / L	<10	N.R	N.E

Dirección: Cra 27 No 10-02 Los Álamos – Pereira-Risaralda-Colombia- Laboratorio de Análisis de Aguas y Alimentos Edificio 8 Piso 1 y 2.  
Teléfonos: Telefax: (57) (6) 321 5750 / 313 7437 / e-mail: [labaguas@utp.edu.co](mailto:labaguas@utp.edu.co)

NIT: 891.480.035 - 9 / Código Postal: 660003 / Conmutador:(57) (6) 313 7300 / Fax: 321 3206 / Dirección: Cra 27 No 10 - 02 Los Álamos - Pereira - Risaralda - Colombia / [www.utp.edu.co](http://www.utp.edu.co)  
Reacreditada como Institución de Alta Calidad por el Ministerio de Educación Nacional 2013 - 2021

VICERRECTORÍA DE INVESTIGACIONES  
 INNOVACION Y EXTENSION  
 LABORATORIO DE ANALISIS DE AGUAS Y ALIMENTOS  
 INFORME DE ENSAYOS No 149/21

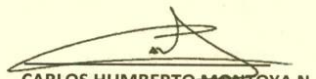
Código	123-LAA-F06
Versión	9
Fecha	2019-08-16
Página	2 de 3

RESULTADOS						
Fecha del ensayo	Ensayo	Método	Unidades	Código interno: 104-1		Rango permitido
				Resultado	Uexp	
2021-02-10	*Sulfatos	SM: 4500-SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> E. Método Turbidimétrico	mg SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> / L	<5	N.R	N.E
2021-02-10	*Nitratos	SM: 4500-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> B. Método Espectrofotométrico Ultravioleta	mg NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> / L	0,11	± 0,16	N.E
2021-02-10	*Nitritos	SM: 4500-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> B. Método Colorimétrico	mg NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> / L	< 0,01	N.R	N.E
2021-02-17	*Hierro Total	SM: 3030 E. Digestión Ácido Nítrico SM: 3111 B. Método Espectrometría Absorción Atómica, Directo Llama – Aire-Acetileno	mg Fe / L	0,15	± 0,02	N.E
2021-02-10	Coliformes Totales	ISO 9308-1 – Método Filtración por Membrana	UFC /100 mL	2,3x10 <sup>4</sup>	N.E	N.E
	<i>Escherichia coli</i>		UFC /100 mL	7,0x10 <sup>1</sup>	N.E	N.E

(\*) Ensayos Acreditados ONAC

Elaboró: Betty P.

  
**ARIEL FELIPE ARCILA Z.**  
 Profesional I  
 Matrícula PQI-0181  
 Revisó

  
**CARLOS HUMBERTO MONTOYA N.**  
 Director de Laboratorio  
 Matrícula PQI-0177  
 Autorizó

**OBSERVACIONES:**

- El Laboratorio de Análisis de Aguas y Alimentos-UTP está autorizado por el Ministerio de la Protección Social para realizar análisis organolépticos, físicos, químicos y microbiológicos al agua potable.
- Los métodos utilizados en la ejecución de los ensayos para los análisis de aguas, han sido tomados del Standard Methods for The Examination of Water and Wastewater 23 RD Edition 2017".
- En el Laboratorio de Análisis de Aguas y Alimentos-UTP contamos con acreditación ONAC, vigente a la fecha, con código de acreditación 10-LAB-029, bajo la Norma NTC-ISO/IEC 17025:2017, en los siguientes ensayos para:  
 Aguas envasadas, Aguas tratadas y Aguas crudas: Alcalinidad Total, Dureza Total, Aluminio Total, Hierro Total, Fluoruros, Conductividad, Nitritos, Nitratos, Turbiedad, Zinc Total, Magnesio Total, Calcio Total, Manganeso Total, Cobre Total, Cloruros, Dureza Cálctica, Sulfatos.  
 Aguas de piscina: Aluminio Total, Dureza Total  
 Análisis para bebidas alcohólicas (ron – aguardiente): Hierro y Cobre.
- Los ensayos que están cubiertos por la acreditación se distinguen con un asterisco (\*), los demás ensayos no están cubiertos dentro del alcance.

Dirección: Cra 27 No 10-02 Los Álamos – Pereira-Risaralda-Colombia- Laboratorio de Análisis de Aguas y Alimentos Edificio 8 Piso 1 y 2.  
 Teléfonos: Telefax: (57) (6) 321 5750 / 313 7437 / e-mail: labaguas@utp.edu.co





Universidad  
Tecnológica  
de Pereira



VICERRECTORÍA DE INVESTIGACIONES  
INNOVACION Y EXTENSION  
LABORATORIO DE ANALISIS DE AGUAS Y ALIMENTOS  
INFORME DE ENSAYOS No 149/21

Código	123-LAA-F06
Versión	9
Fecha	2019-08-16
Página	3 de 3

- Los resultados contenidos en el presente informe se refieren al momento y condiciones en que se realizaron los ensayos. El laboratorio no se responsabiliza de los perjuicios que puedan derivarse del uso inadecuado de la información aquí contenida y de las muestras analizadas.
- Los ensayos fueron realizados en las instalaciones del laboratorio de Análisis de Aguas y Alimentos, bajo sus condiciones ambientales.
- Los resultados de este informe hacen referencia única y exclusivamente a las muestras analizadas.
- Los ensayos microbiológicos son realizados por un profesional en el área.
- Sin la aprobación del laboratorio, no se debe reproducir el informe, excepto cuando se reproduce en su totalidad.
- Cuando es responsabilidad del laboratorio realizar la toma de muestra (s), se sigue el instructivo de toma de muestras. Cuando el cliente es el que toma la (s) muestra (s), el laboratorio no se hace responsable de la información suministrada; por lo tanto, los resultados se aplican a la (s) muestra (s) conforme se recibieron.
- Luego de la entrega del Informe de Ensayos, existe un espacio de tiempo máximo de 15 días hábiles para la atención de reclamos.
- **ABREVIATURAS: (\*) Ensayos Acreditados ONAC** - N.R: No reporta - N.E: No establecido - Rango Permitido: Valor permitido dependiendo del tipo de muestra y de acuerdo a las especificaciones de la normatividad para cada matriz - Uexp: Incertidumbre expandida.

----- FIN DEL INFORME -----

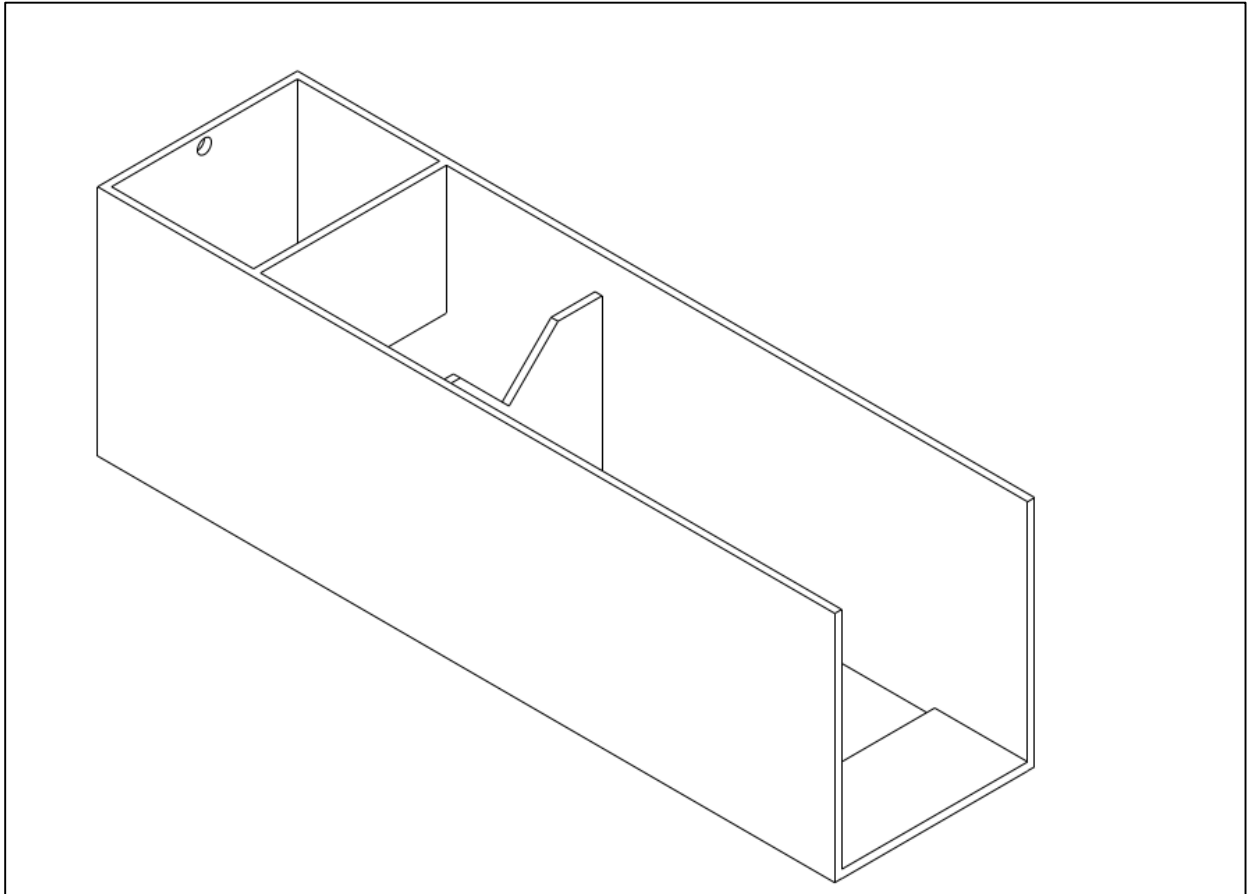
Dirección: Cra 27 No 10-02 Los Álamos – Pereira-Risaralda-Colombia- Laboratorio de Análisis de Aguas y Alimentos Edificio 8 Piso 1 y 2.  
Teléfonos: Telefax: (57) (6) 321 5750 / 313 7437 / e-mail: [labaguas@utp.edu.co](mailto:labaguas@utp.edu.co)

NIT: 891.480.035 - 9 / Código Postal: 660003 / Conmutador:(57) (6) 313 7300 / Fax: 321 3206 / Dirección: Cra 27 N° 10 - 02 Los Álamos - Pereira - Risaralda - Colombia / [www.utp.edu.co](http://www.utp.edu.co)  
Reacreditada como Institución de Alta Calidad por el Ministerio de Educación Nacional 2013 - 2021

**ANEXO 2**  
**DISEÑO VERTEDERO TRIANGULAR DE 90°**

**Figura 17.**

*Vista isométrica vertedero triangular de 90°*

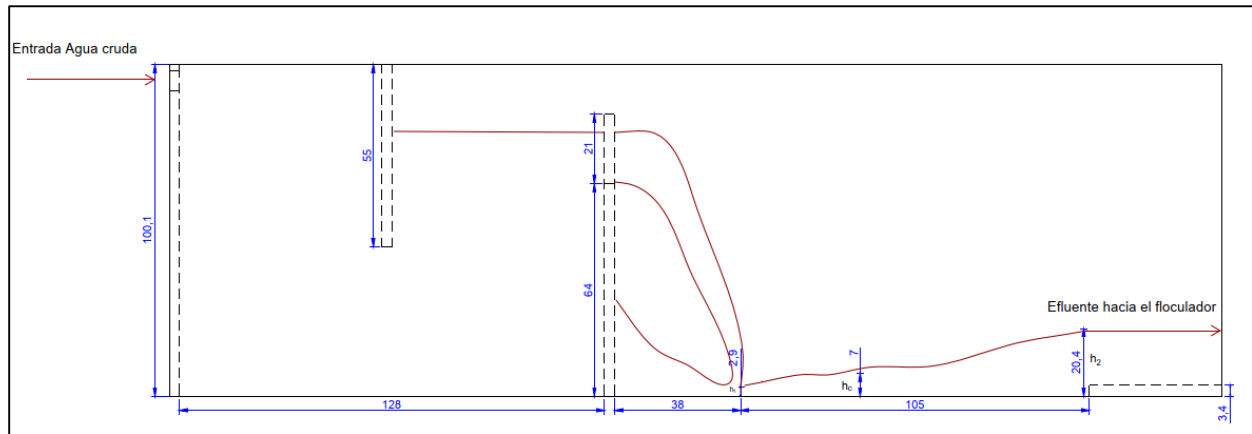


**Nota.** Esta figura representa la vista isométrica del diseño del vertedero triangular de 90° para el proceso de coagulación. Hecho en AutoCAD.



**Figura 19.**

*Vista lateral del vertedero triangular de 90°*



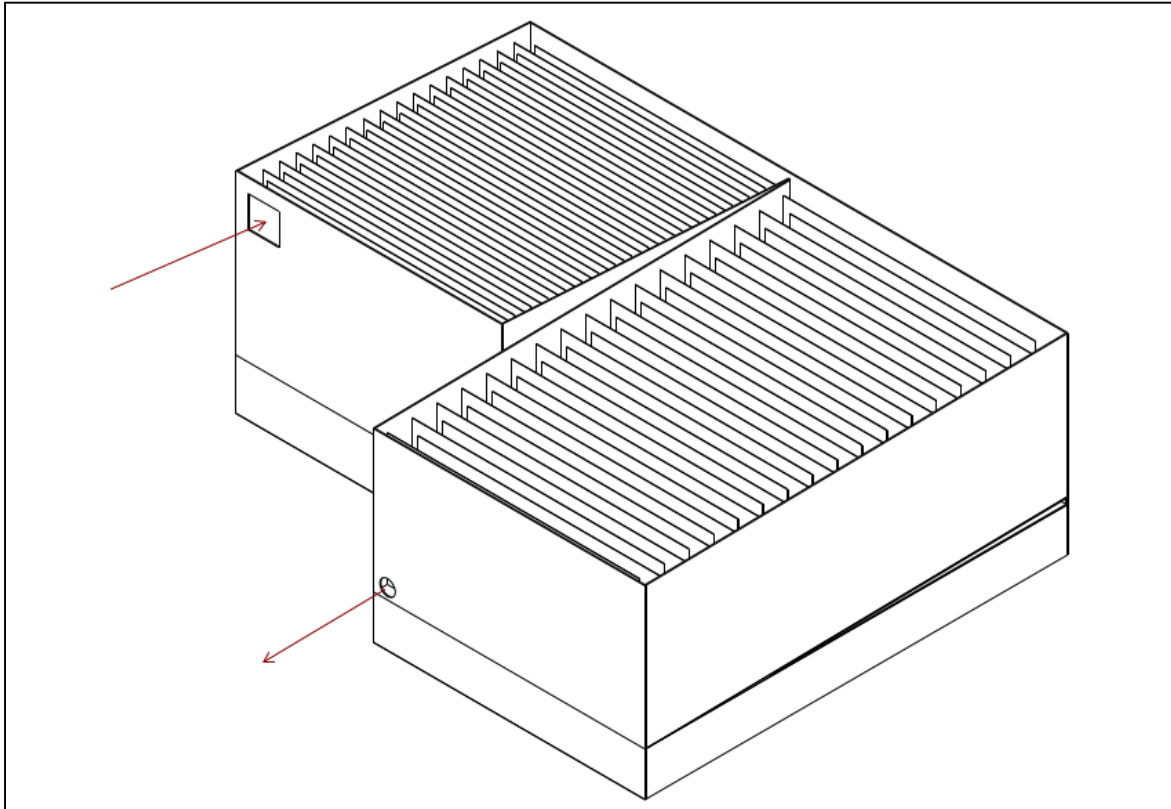
**Nota.** Esta figura representa las acotaciones de la vista lateral del diseño del vertedero triangular de 90° para el proceso de coagulación. Hecho en AutoCAD.



**ANEXO 3**  
**DISEÑO FLOCULADOR**

**Figura 20.**

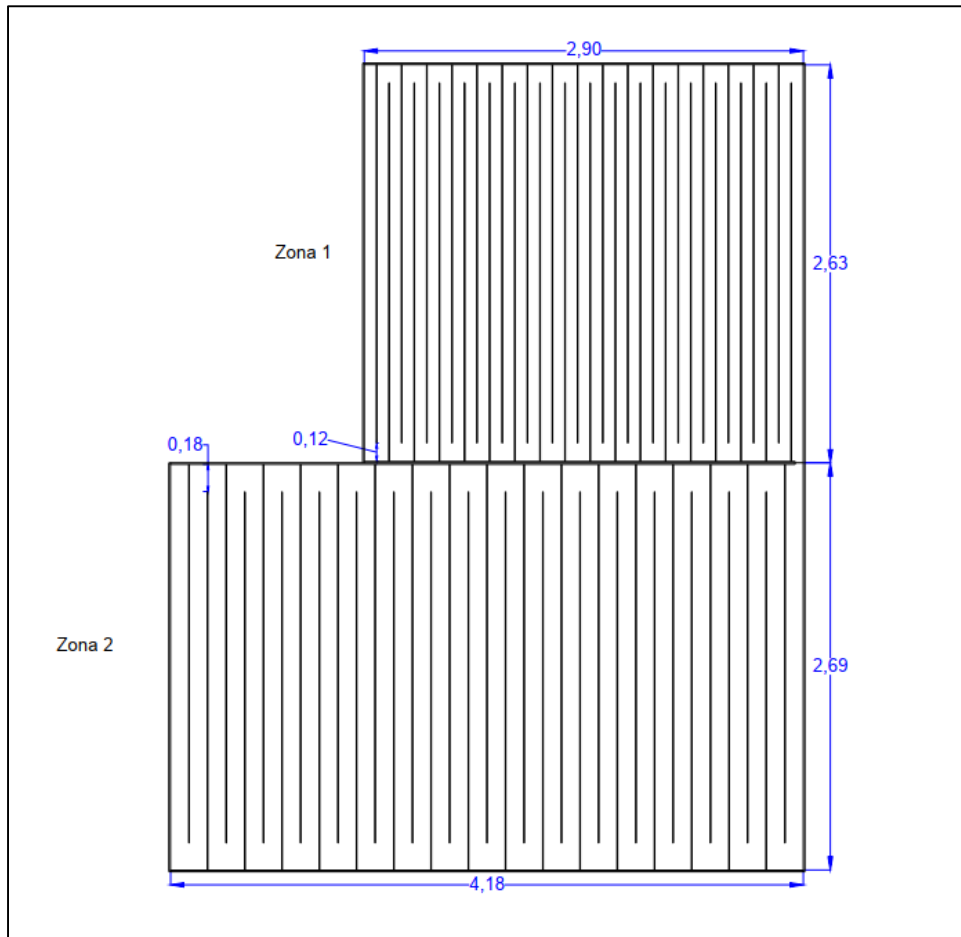
*Vista isométrica floculador horizontal*



**Nota.** Esta figura representa la vista isométrica del diseño del floculador horizontal para el proceso de floculación. Hecho en AutoCAD.

**Figura 21.**

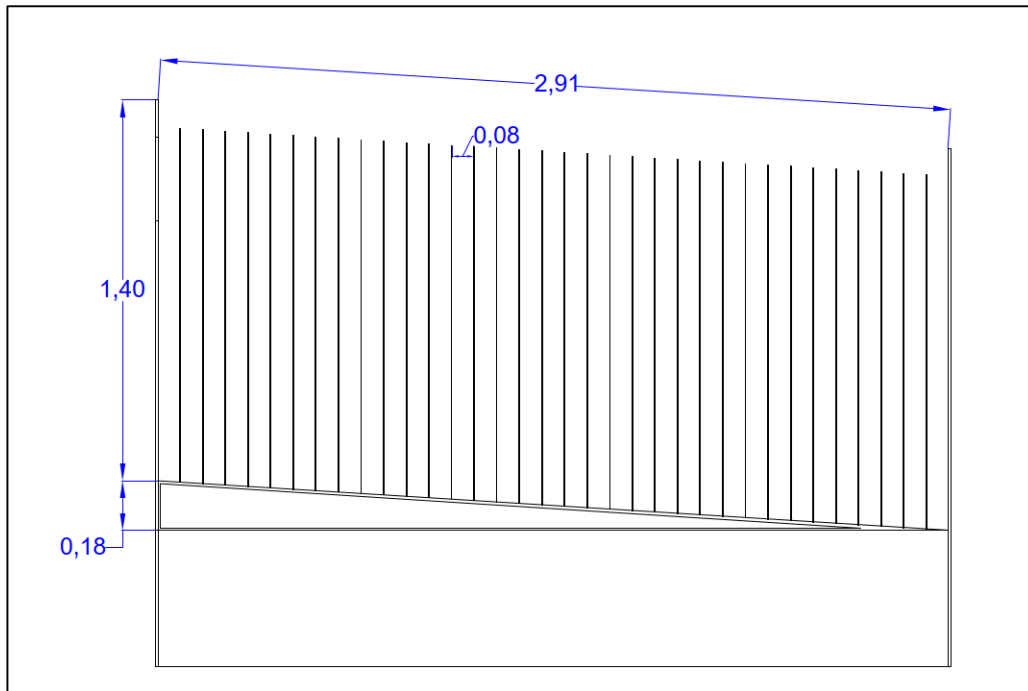
*Vista superior floculador horizontal*



**Nota.** Esta figura representa las acotaciones de la vista superior del diseño del floculador horizontal para el proceso de floculación. Hecho en AutoCAD.

**Figura 22.**

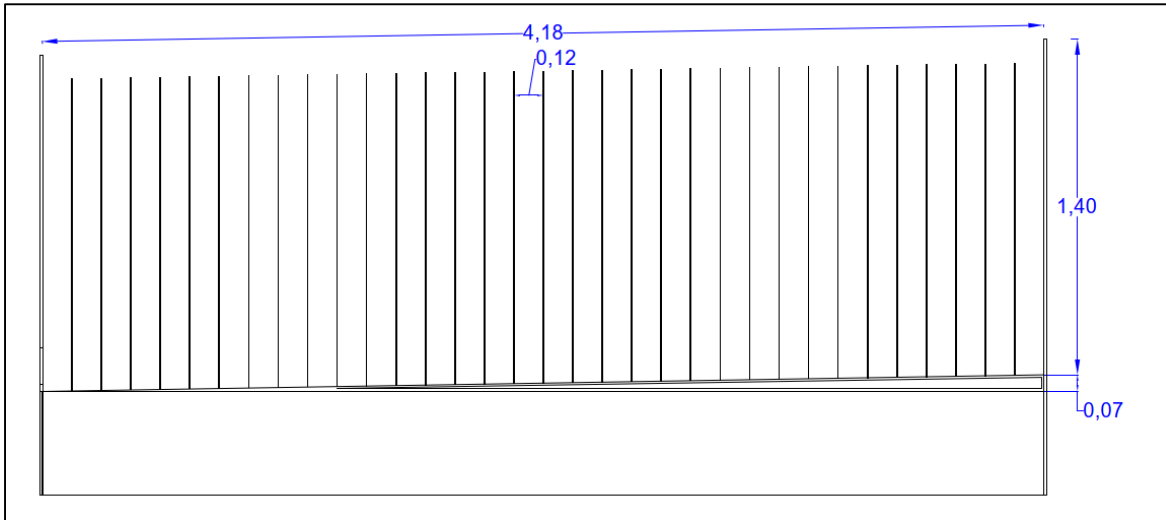
*Vista lateral de la zona 1 del floculador horizontal*



**Nota.** Esta figura representa las acotaciones de la vista lateral del diseño de la zona 1 del floculador horizontal para el proceso de floculación. Hecho en AutoCAD.

**Figura 23.**

*Vista lateral de la zona 2 del floculador horizontal*

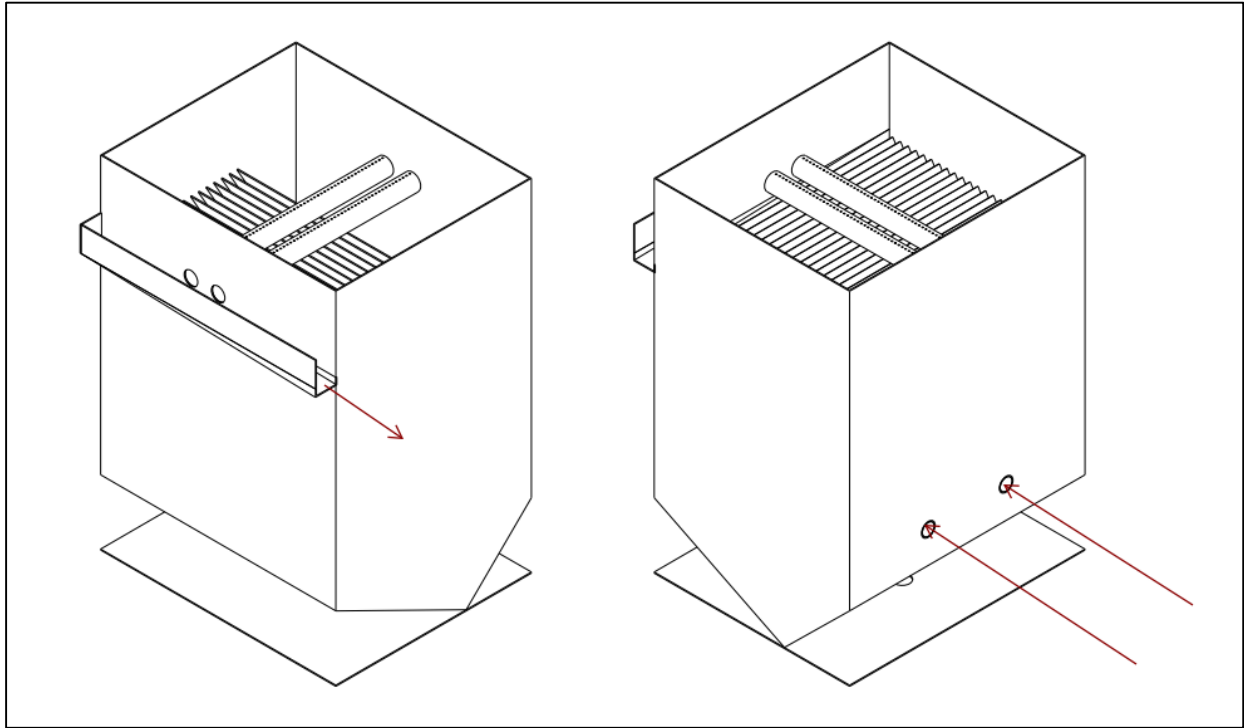


**Nota.** Esta figura representa las acotaciones de la vista lateral del diseño de la zona 2 del floculador horizontal para el proceso de floculación. Hecho en AutoCAD.

**ANEXO 4**  
**DISEÑO CLARIFICADOR**

**Figura 24.**

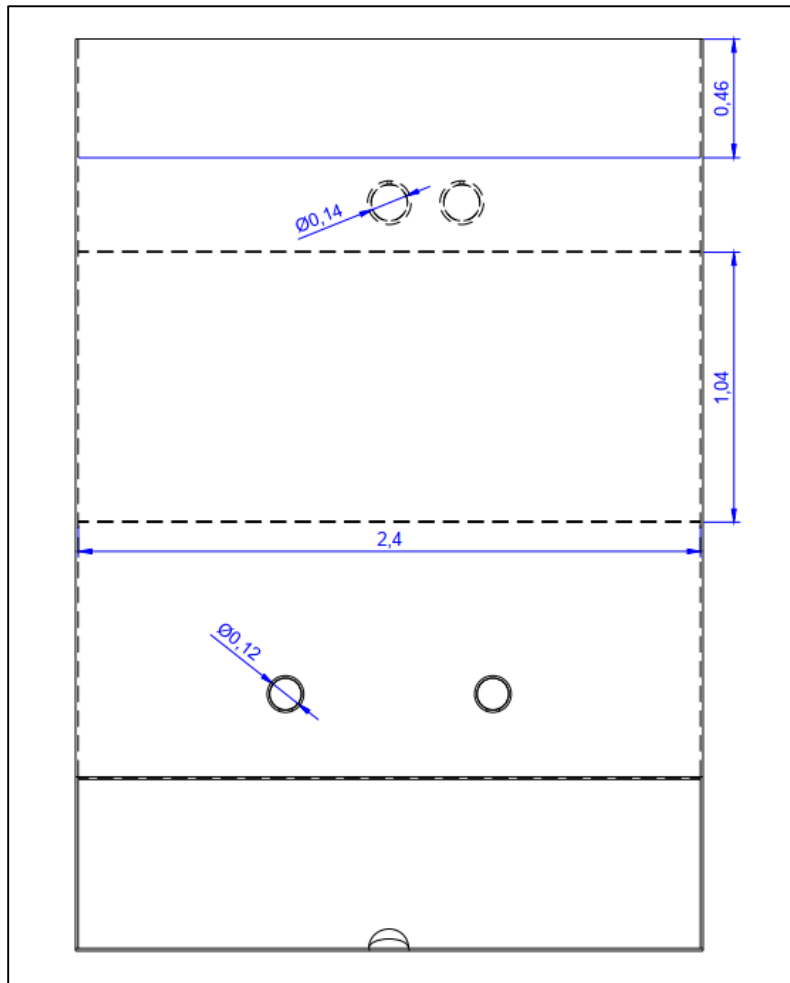
*Vista isométrica clarificador lamelar*



**Nota.** Esta figura representa la vista isométrica del diseño del clarificador lamelar para el proceso de sedimentación. Hecho en AutoCAD.

**Figura 25.**

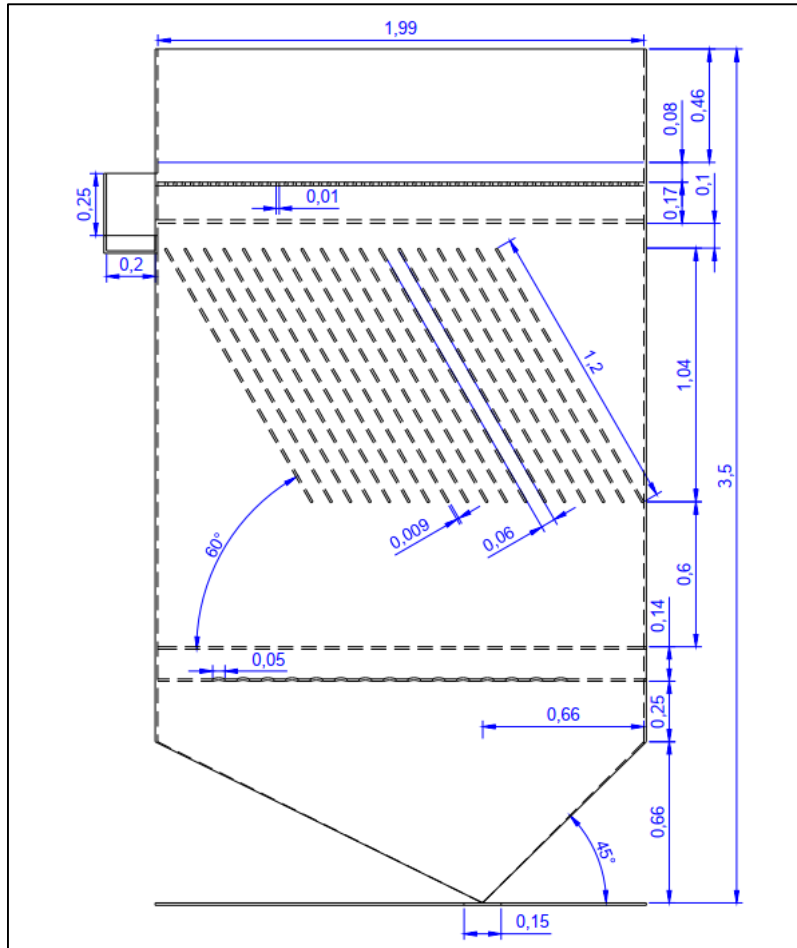
*Vista frontal clarificador lamelar*



**Nota.** Esta figura representa las acotaciones de la vista frontal del diseño del clarificador lamelar para el proceso de sedimentación. Hecho en AutoCAD.

**Figura 1.**

*Vista lateral clarificador lamelar*

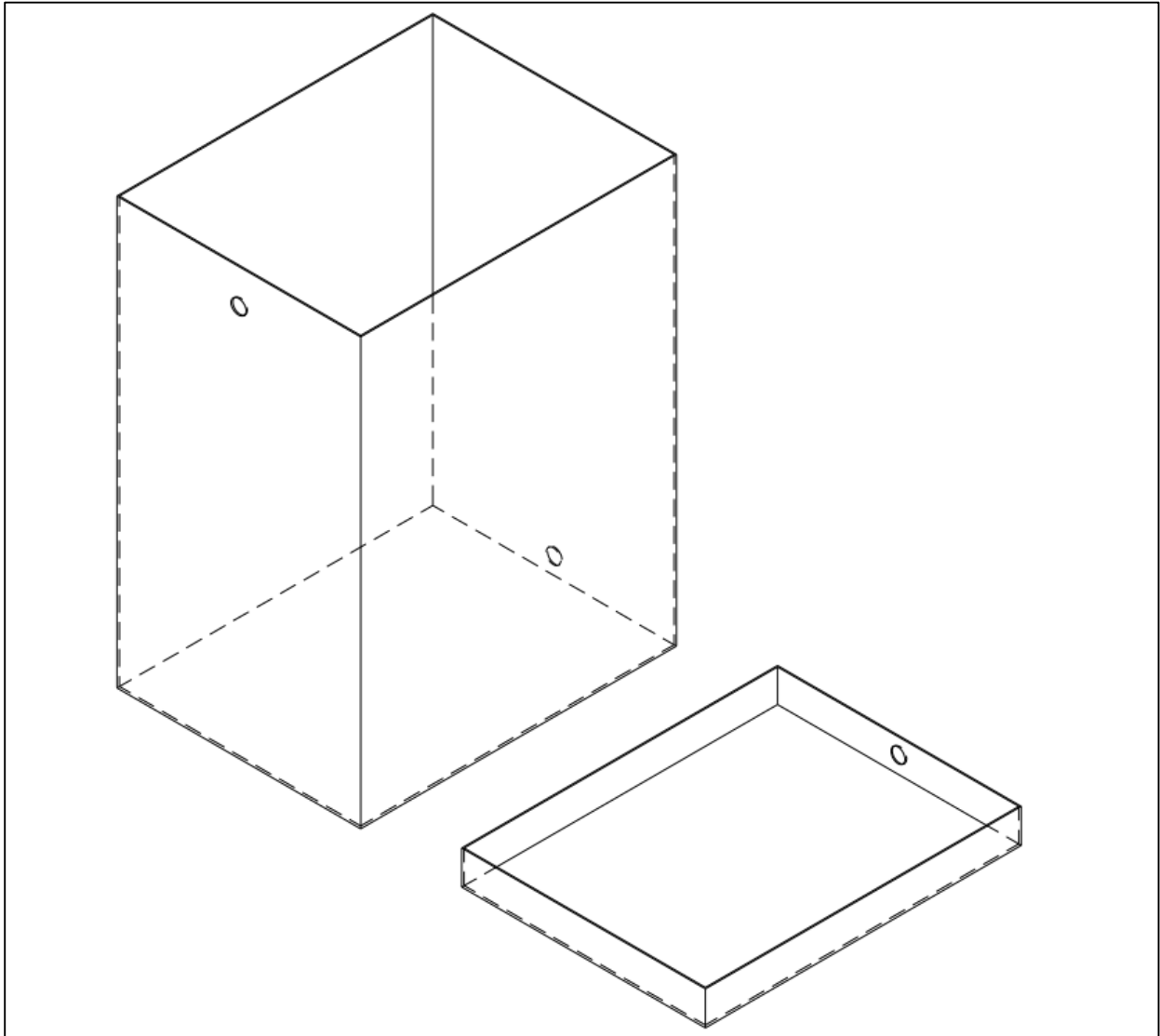


**Nota.** Esta figura representa las acotaciones de la vista lateral del diseño del clarificador lamelar para el proceso de sedimentación. Hecho en AutoCAD.

**ANEXO 5**  
**UNIDAD DE FILTRACIÓN**

**Figura 26.**

*Vista isométrica del filtro rápido de arena*

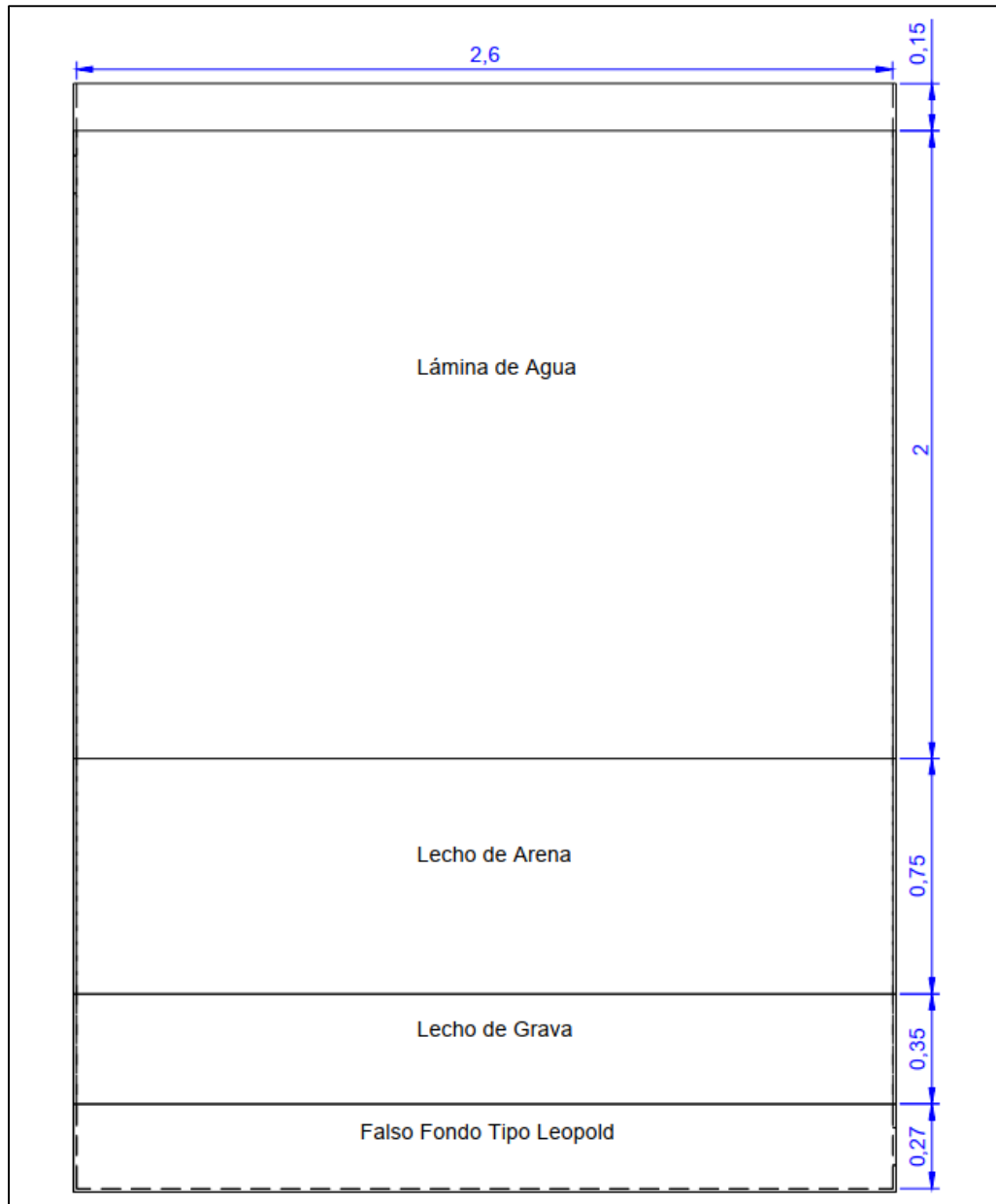


**Nota.** Esta figura representa la vista isométrica del diseño del filtro rápido de arena para el proceso de filtración. Hecho en AutoCAD.



**Figura 27.**

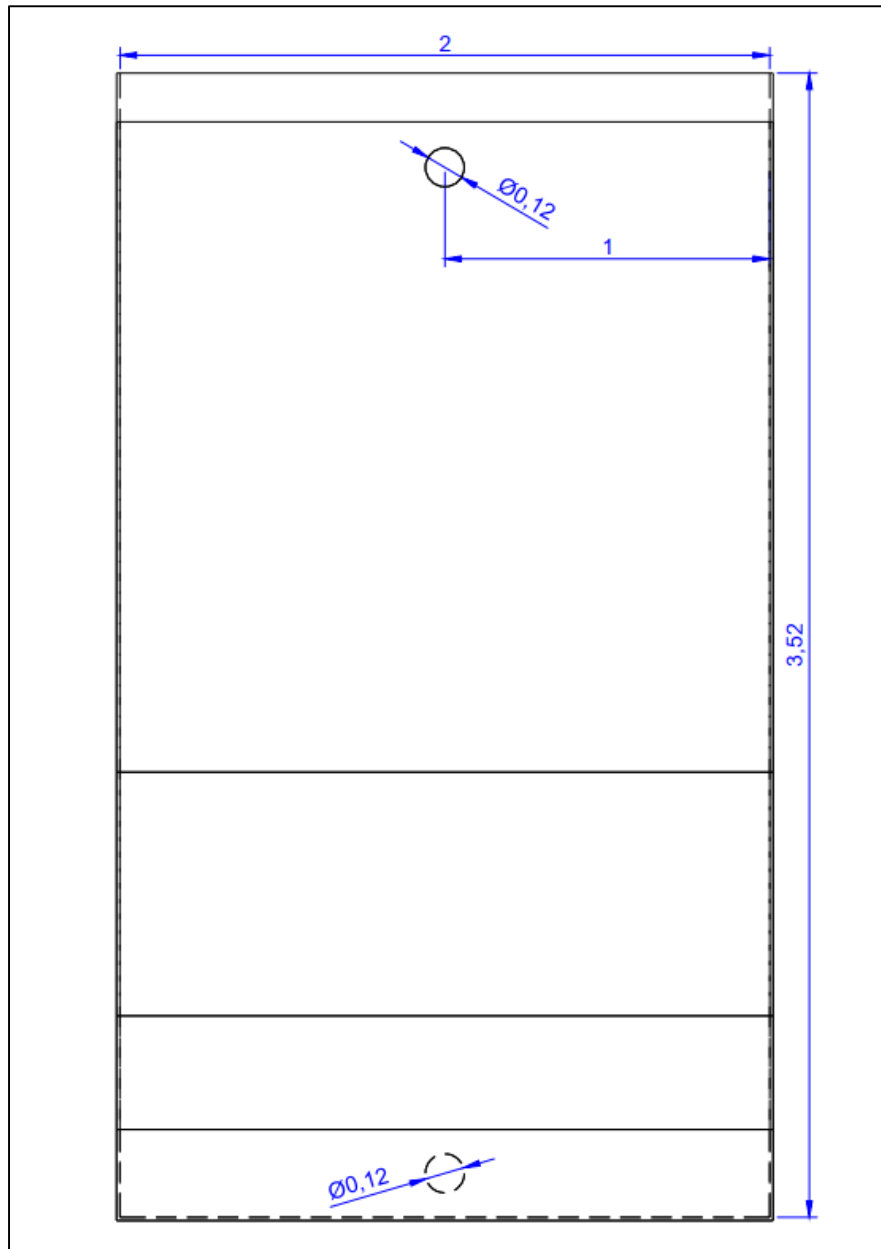
*Vista lateral del filtro rápido de arena*



**Nota.** Esta figura representa las acotaciones de la vista lateral del diseño del filtro rápido de arena para el proceso de filtración. Hecho en AutoCAD.

**Figura 28.**

*Vista frontal del filtro rápido de arena*

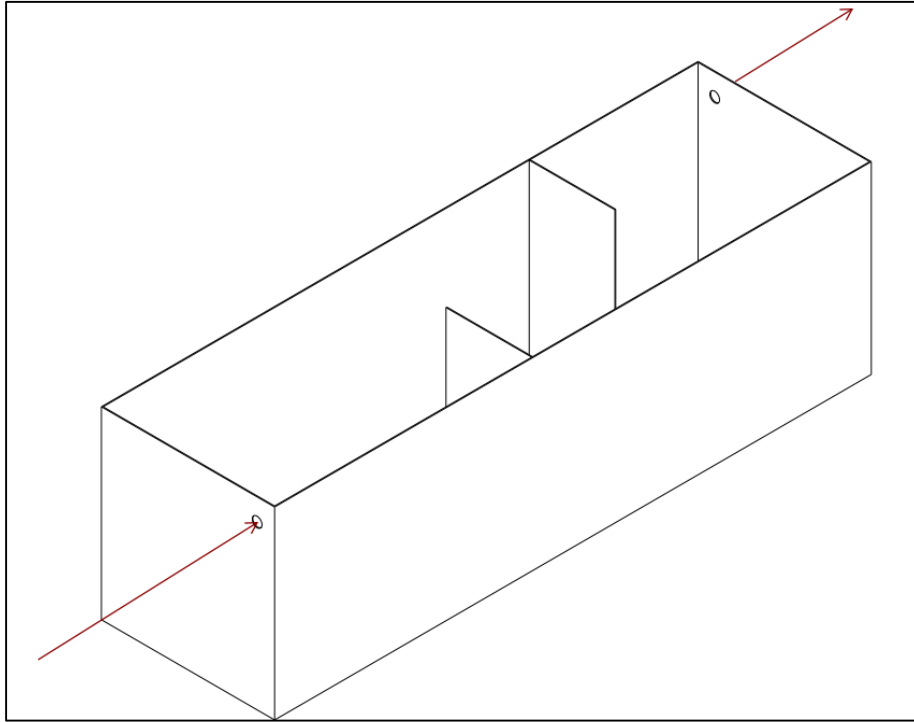


**Nota.** Esta figura representa las acotaciones de la vista frontal del diseño del filtro rápido de arena para el proceso de filtración. Hecho en AutoCAD.

**ANEXO 6**  
**DISEÑO TANQUE DE DESINFECCIÓN**

**Figura 29.**

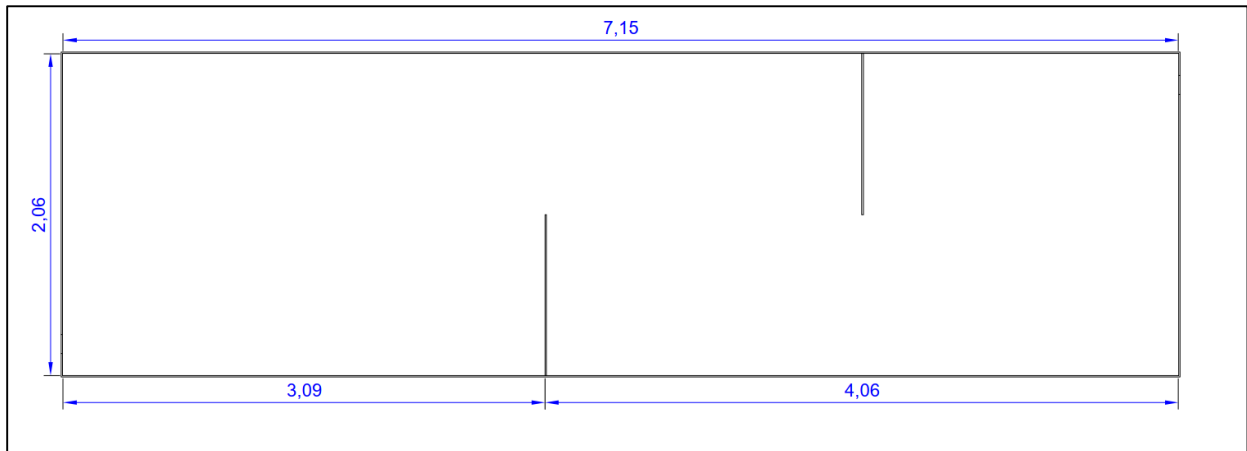
*Vista isométrica del tanque de desinfección*



**Nota.** Esta figura representa la vista isométrica del diseño del tanque para el proceso de desinfección. Hecho en AutoCAD.

**Figura 30.**

*Vista superior del tanque de desinfección*

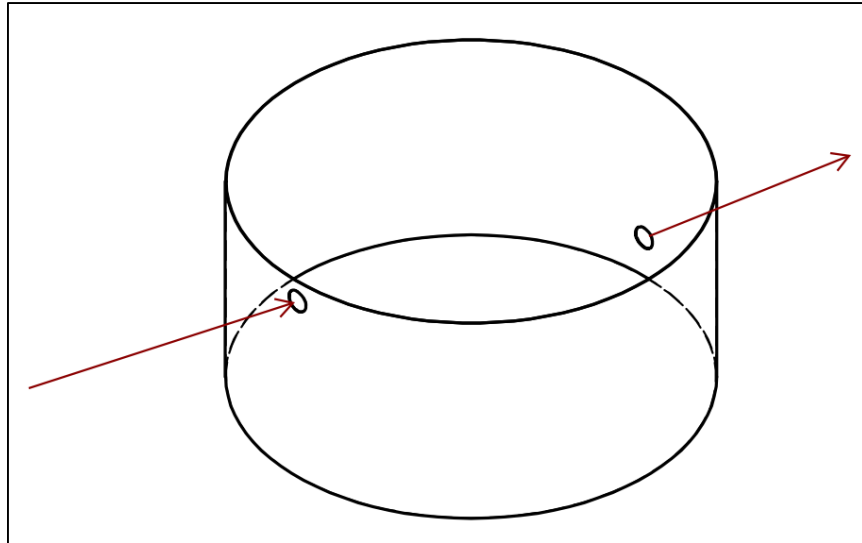


**Nota.** Esta figura representa las acotaciones de la vista superior del diseño del tanque para el proceso de desinfección. Hecho en AutoCAD.

**ANEXO 7**  
**DISEÑO TANQUE DE ALMACENAMIENTO**

**Figura 31.**

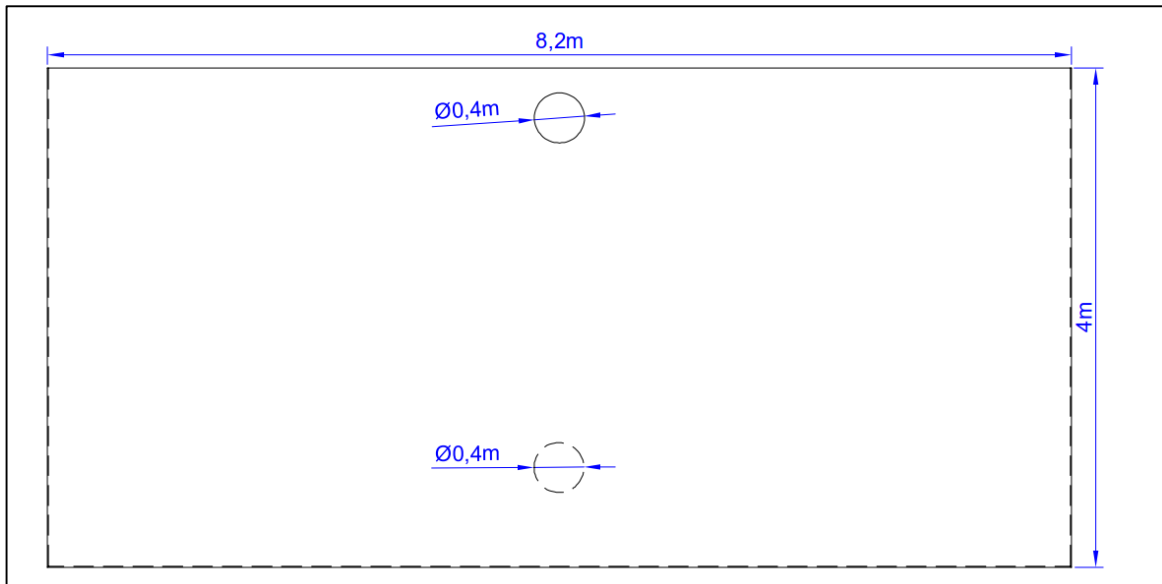
*Vista isométrica del tanque de almacenamiento*



**Nota.** Esta figura representa la vista isométrica del diseño del tanque para el proceso de almacenamiento de agua potable. Hecho en AutoCAD.

**Figura 32.**

*Vista lateral del tanque de almacenamiento*



**Nota.** Esta figura representa las acotaciones de la vista lateral del diseño del tanque para el proceso de almacenamiento de agua potable. Hecho en AutoCAD.

## **ANEXO 8**

### **RECOMENDACIONES**

Establecer el valor de algunas propiedades físico químicas desconocidas en diferentes épocas del año, para asegurar que el sistema tenga la capacidad de abastecer a la comunidad a lo largo del periodo de diseño.

Realizar un estudio de jarras a nivel laboratorio para corroborar los valores estimado para el comportamiento de las partículas contaminantes presentes en el agua, así como su comportamiento ante diferentes coagulantes y floculantes.

Implementar un laboratorio donde, se pueda identificar las propiedades fisicoquímicas al inicio y al final del sistema, con el objetivo de asegurar la calidad final del agua.

Realizar la caracterización de los lodos residuales, para así evaluar el diseño del sistema de tratamiento de lodos experimentalmente, así como su disposición final más adecuada de acuerdo al contexto de la comunidad.

Evaluar el sistema de control e instrumentación que permita la correcta operación de cada unidad establecida en el sistema de tratamiento, midiendo y controlando las variables críticas de operación de cada unidad.

Realizar un estudio topográfico, el cual permita definir la locación específica de la planta de tratamiento y su buen funcionamiento.

Evaluar la etapa de coagulación con las canaletas Parshall de manera experimental, ya que se pueden presentar mejores eficiencias en la implementación.

Corroborar experimentalmente las propiedades fisicoquímicas a la entrada y a la salida de la unidad de desinfección, con el objetivo de cuantificar la dosificación de desinfectante adecuada en tiempo real.

Esclarecer los costos de implementación del sistema teniendo en cuenta otros costos variables como lo son transporte, energía, mantenimiento, entre otros, de acuerdo al contexto de la comunidad.

Comprobar si haciendo uso de la unidad de filtración únicamente se puede llegar cumplir con la turbiedad inferior a los 2 NTU de manera experimental.

Corroborar la curva de demanda de cloro de manera experimental, para determinar la dosificación de cloro necesaria para el proceso de desinfección.