



## **ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

**Rediseño del sistema de tratamiento de la planta de agua potable El Tambo del cantón Pelileo, para mejorar la remoción de fluoruros**

**MYRIAM LIZETH MORALES PILATAXI**

**Trabajo de Titulación modalidad Proyectos de Investigación y Desarrollo, presentado ante el Instituto de Posgrado y Educación Continua de la ESPOCH, como requisito parcial para la obtención del grado de**

**MAGÍSTER EN INGENIERÍA QUÍMICA APLICADA.**

**RIOBAMBA - ECUADOR  
NOVIEMBRE -2022**

**©2022, Myriam Lizeth Morales Pilataxi**

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

EL TRIBUNAL DE TRABAJO DE TITULACIÓN CERTIFICA QUE:

El Trabajo de Titulación modalidad Proyectos de Investigación y Desarrollo, titulado **Rediseño del sistema de tratamiento de la planta de agua potable El Tambo del cantón Pelileo, para mejorar la remoción de fluoruros**, de responsabilidad de la señorita Myriam Lizeth Morales Pilataxi ha sido prolijamente revisado y se autoriza su presentación.

Ing. Galo Briam Montenegro Cordova; PhD.  
**PRESIDENTE**



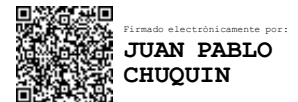
Ing. Daniel Antonio Chuquin Vasco; Mag.  
**DIRECTOR**



Ing. Mabel Mariela Parada Rivera; Mag.  
**MIEMBRO**



Ing. Juan Pablo Chuquin Vasco; Mag.  
**MIEMBRO**



Riobamba, noviembre - 2022

## **DERECHOS INTELECTUALES**

Yo, Myriam Lizeth Morales Pilataxi, declaro que soy responsable de las ideas, doctrinas y resultados expuestos en el Trabajo de Titulación modalidad Proyectos de Investigación y Desarrollo, y que el patrimonio intelectual generado por la misma pertenece exclusivamente a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.



**FIRMA**

C.C.: 180387958-2

## **DEDICATORIA**

Durante toda mi vida me he sentido la persona más afortunada por tener una familia llena de amor, alegría y unión, definitivamente es el mejor regalo que Dios me ha dado.

Le doy gracias a mis padres Mirian y Pedro por apoyarme en todo momento, por los valores que me han inculcado, y por haberme dado la oportunidad de tener una excelente educación en el transcurso de mi vida. Sobre todo por ser un excelente ejemplo de vida a seguir. Todo el amor que nos han unido jamás desaparecerá y en honor a este sentimiento quiero dedicar este trabajo a mis amados padres.

A mi valiente y luchadora mamá, por jamás soltarme y no permitir que me caiga a pesar de lo difícil de los días, gracias por no dejar que me pierda en el camino para cumplir este sueño, por tu amor, paciencia y consejos. Jamás me vaya a faltar!

A la memoria de mi amado Pa!, gracias por guiarme y protegerme estés donde estés. Tu presencia la siento en cada bendición y sé que celebrarás conmigo la culminación de esta meta, todo lo que soy es gracias a ti.

Lizeth.

## **AGRADECIMIENTO**

Dios, cada uno de mis logros hasta el día de hoy han sido una bendición en todo sentido. Gracias por ser mi fortaleza en los momentos de debilidad y por brindarme una vida llena de aprendizajes, experiencias y sobre todo felicidad. Jamás podré agradecer cuan misericordioso eres conmigo a pesar de mis errores.

Lizeth.

## TABLA DE CONTENIDOS

RESUMEN .....	xii
SUMARY .....	xiii

### CAPÍTULO I

1.	INTRODUCCIÓN .....	1
1.1.	Planteamiento del problema .....	1
1.2.	Situación problemática .....	1
1.3.	Formulación del problema.....	1
1.3.1.	Problemas específicos.....	2
1.4.	Justificación de la investigación .....	2
1.5.	Objetivos de la investigación.....	3
1.5.1.	Objetivo general .....	3
1.5.2.	Objetivos específicos.....	3
1.6.	Hipótesis.....	3
1.6.1.	Hipótesis general .....	3
1.6.2.	Hipótesis específicas .....	4

### CAPÍTULO II

2.	MARCO TEÓRICO .....	5
2.1.	Antecedentes de la investigación .....	5
2.2.	Marco conceptual .....	8
2.1.1.	Aguas subterráneas .....	8
2.1.2.	Fluoruros .....	9
2.1.3.	Tratamientos para la remoción de fluoruros .....	13
2.3.	Método para determinar la concentración de fluoruro .....	23
2.4.	Parámetros de control de calidad con respecto a la normativa vigente.....	23

2.5.	Bases teóricas .....	23
------	----------------------	----

### **CAPÍTULO III**

3.	DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN .....	25
3.1.	Metodología .....	25
3.1.1.	Tipo y diseño de investigación .....	25
3.2.	Enfoque de la investigación .....	25
3.3.	Métodos de investigación .....	25
3.4.	Identificación de las variables.....	25
3.4.1.	Variable dependiente .....	25
3.4.2.	Variable independiente .....	25
3.5.	Operacionalización de variables .....	26
3.6.	Matriz de consistencia .....	27
3.7.	Diseño de la investigación .....	29
3.8.	Población de estudio.....	29
3.8.1.	Ubicación de la planta .....	29
3.9.	Unidad de análisis .....	30
3.10.	Selección de la muestra .....	30
3.11.	Tamaño de muestra.....	30
3.12.	Técnicas de recolección de datos.....	30
3.13.	Instrumentos para procesar datos recopilados.....	30
3.14.	Tratamiento y diseño experimental.....	30

### **CAPÍTULO IV**

4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	32
4.1.	Análisis de resultados .....	32
4.1.1.	Evaluación de la situación actual de la planta .....	32
4.1.2.	Pruebas de tratabilidad.....	34



4.1.3.	Análisis de los resultados de las pruebas de tratabilidad.....	36
4.2.	Comprobación de hipótesis.....	39
4.3.	Propuesta - Cálculos .....	40
4.3.1.	Cálculos para el sistema de intercambio iónico .....	40
4.3.2.	Cálculos del sistema de regeneración .....	44
4.4.	Discusión de resultados .....	47
CONCLUSIONES .....		51
RECOMENDACIONES .....		53
GLOSARIO		
BIBLIOGRAFIA		
ANEXOS		

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1-2.</b> Límites máximos recomendados de fluoruro por día.....	11
<b>Tabla 2-2.</b> Elemental composition of fresh alúmina. ....	16
<b>Tabla 3-2.</b> Contaminantes eliminados por intercambio iónico.....	18
<b>Tabla 4-3.</b> Operación de variables .....	26
<b>Tabla 5-3.</b> Matriz de consistencia.....	27
<b>Tabla 6-3.</b> Predicción de eficiencias de los tratamientos propuestos .....	31
<b>Tabla 7-4.</b> Concentración de fluoruros (mg/L) en el agua en el año 2021 .....	33
<b>Tabla 8-4.</b> Test 1 ablandamiento con CaO.....	34
<b>Tabla 9-4.</b> Test 2 ablandamiento con CaO.....	34
<b>Tabla 10-4.</b> Test 1 ablandamiento con CaOMgO .....	34
<b>Tabla 11-4.</b> Test 2 ablandamiento con CaOMgO .....	34
<b>Tabla 12-4.</b> Test 1 osmosis inversa.....	35
<b>Tabla 13-4.</b> Test 2 osmosis inversa.....	35
<b>Tabla 14-4.</b> Test 1 alúmina activada, jarras .....	35
<b>Tabla 15-4.</b> Test 2 alúmina activada, jarras .....	35
<b>Tabla 16-4.</b> Test 3 alúmina activada, filtro .....	36
<b>Tabla 17-4.</b> Test 4 alúmina activada, filtro2 .....	36
<b>Tabla 18-4.</b> Test 1 intercambio iónico .....	36
<b>Tabla 19-4.</b> Test 2 intercambio iónico .....	36
<b>Tabla 20-4.</b> Eficiencia resultante de los procesos de tratamientos propuestos .....	37
<b>Tabla 21- 4.</b> Resultados de pH, turbidez y color.....	38
<b>Tabla 22- 4.</b> Características de la corriente de ingreso.....	40
<b>Tabla 23-4.</b> Densidad de soluciones NaCl.....	46
<b>Tabla 24-4.</b> Costos de los tratamientos con mayor remoción .....	48
<b>Tabla 25-4.</b> Detalle de costos para la columna de intercambio iónico .....	49

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1-2.</b> Distribución del agua en el planeta .....	8
<b>Figura 2-2.</b> Preparación del Absorbente .....	17
<b>Figura 3-3.</b> Pasos de la investigación .....	29
<b>Figura 4-4.</b> Ubicación de la planta El Tambo .....	29
<b>Figura 5-4.</b> Balance en la etapa de intercambio iónico .....	42
<b>Figura 6-4.</b> Tasa de flujo de retrolavado vs expansión del lecho .....	44
<b>Figura 7-4.</b> Comparación de resultados .....	48
<b>Figura 8-4.</b> Diagrama del tratamiento propuesto, planta El Tambo .....	49
<b>Figura 9-4.</b> Diseño planta final .....	50

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

<b>Gráfico 1-4.</b> Tratamiento de agua potable actual .....	32
<b>Gráfico 2-4.</b> Fluoruros año 2021 .....	33
<b>Gráfico 3-4.</b> Concentración de fluoruros en cada proceso .....	37
<b>Gráfico 4-4.</b> Resultados de pH en cada proceso .....	38
<b>Gráfico 5-4.</b> Resultados de Turbidez en cada proceso .....	38
<b>Gráfico 6-4.</b> Resultados de color en cada proceso .....	39

## **ÍNDICE DE ANEXOS**

**Anexo A:** NTE INEN 1108:2020

**Anexo B:** TULSMA, LIBRO VI, ANEXO 1

**Anexo C:** Procedimientos fluoruros.

**Anexo D:** Planta “El Tambo” – tratamiento actual.

**Anexo E:** Pruebas de tratabilidad.

**Anexo F:** Comparación resultados de laboratorio inicial, final y norma.

**Anexo G:** Planos del rediseño

## RESUMEN

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo el rediseño de una planta de tratamiento de agua potable para el Gobierno Autónomo Descentralizado de San Pedro de Pelileo, con el propósito de disminuir la concentración del contaminante fluoruro y cumplir con los límites permisibles según la norma NTE INEN 1108-2020. Se aplicaron y compararon a nivel de laboratorio cuatro métodos propuestos con mayor de eficiencia en remoción según la revisión bibliográfica previa, dentro de los cuales son ablandamiento con cal, osmosis inversa, intercambio iónico y alúmina activada. Las muestras se recolectaron tanto en días soleados como lluviosos para garantizar la homogeneidad de las muestras a analizar. Se aplicó el método HACH 8029 normalizado, según el Standard Methods 4500F-B, D en las pruebas de cada proceso. Los resultados de eficiencia en remoción fueron 63.27% ablandamiento con cal - óxido de calcio (CaO), 38.14% ablandamiento con cal - dolomita, (CaOMgO), 58.03% alúmina activada (AlO<sub>3</sub>), 100% osmosis inversa y 81.02% intercambio iónico. Una vez identificado el método para aplicar al rediseño que tenga una mejor eficiencia en remoción, rentabilidad y de fácil disponibilidad en el mercado nacional; se realiza una caracterización final que garantice que los resultados obtenidos en las pruebas cumplen con lo estipulado en la norma INEN1108. Para garantizar una larga vida útil de la planta de tratamiento se debe planificar mantenimientos anuales y el cambio cada 6 meses de la resina utilizada.

**Palabras claves:** <ABLANDAMIENTO CON CAL>, <OSMOSIS INVERSA>, <INTERCAMBIO IÓNICO>, <ALÚMINA ACTIVADA>, <FLUORUROS>, <REMOCIÓN>, <ZEOLITAS>, <DOLOMITA>, <OXIDO DE CALCIO>, <OXIDO DE ALUMINIO>.



09-11-2022

0164-DBRA-UPT-IPEC-2022

## SUMARY

The objective of the present investigative project was to redesign a water treatment plant for the Gobierno Autónomo Descentralizado de San Pedro in Pelileo, with the purpose of diminishing the concentration of fluoride contaminant yet meeting the permissible quantities according to regulation, NTE INEN 1180-2020. Four highly efficient proposed methods were put into effect and compared in the laboratory for the removal according to the preliminary bibliographical revision; water softening with lime, inverse osmosis, ionic interchange, and activated alumina. The samples were collected on sunny as well as rainy days to guarantee the homogeneity of the samples for analysis. The standard method, HACH 8029, was applied according to the standard method 4500F-B, D in the tests of each process. The results of the efficiency in the removal were: 63.27% water softening with lime – calcium oxide (CaO), 38.14% softening with lime – dolomite, (CaOMgO), 58.03% activated alumina (AlO<sub>3</sub>), 100% inverse osmosis and 81.02% ionic interchange. After having identified the method with which to apply the redesign of the removal process with higher efficiency, rentability, and easy availability in the national market; a final characterization was carried out to guarantee that the obtained test results meet the terms in the regulation INEN1108. To guarantee long lifetime for the treatment plant; annual maintenance should be planned along with the changing of used resin every 6 months.

**Keywords:** <WATER SOFTENING WITH LIME>, <INVERSE OSMOSIS>, <IONIC INTERCHANGE>, <ACTIVATED ALUMINA>, <FLUORIDE>, <REMOVAL>, <ZEOLITE>, <DOLOMITE>, <CALCIUM OXIDE>, <ALUMINUM OXIDE>.

# CAPÍTULO I

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Planteamiento del problema

Este trabajo de investigación aborda el rediseño de la planta de tratamiento de agua potable para mejorar la remoción de fluoruros partiendo del porcentaje de remoción actual, el cual no cumple con los límites permisibles según la norma INEN 1108 – 20 para agua potable, lo cual provoca daños a la salud de toda la población que ha consumido el recurso desde su puesta en marcha en el año 1994. Esta investigación servirá de base para que se replique en otras plantas existentes en el cantón con la misma problemática.

### 1.2. Situación problemática

Una realidad cada vez más evidente, es la contaminación de suelos, aire y agua. No haberle dado la relevancia desde años atrás ha generado nuevos problemas para la salud, la economía y el ambiente. Específicamente, el agua es de suma importancia en la vida de los seres humanos y un recurso que lamentablemente se va agotando por su mala utilización.

La vertiente le proporciona de una serie de minerales propios del suelo al agua, que al ser absorbidos provocan su contaminación, aumentando la concentración normal, es por esto que cada agua dependiendo de la fuente presenta diferente composición química, física y microbiológica. Todo este recurso vital, es aprovechado por las comunidades cercanas a la fuente ya sea como agua de riego o agua de consumo, independientemente de que si cumple o no con las normas para su uso. Al pasar los años las comunidades que han consumido el agua directamente se están viendo afectadas en su salud, principalmente aquellas que la utilizaron como agua de consumo.

El agua de una vertiente para que sea considerada apta para el consumo humano debe ser tratada para eliminar cualquier clase de contaminante o microorganismo que supere al límite máximo permisible impuesto por los organismos de control, motivo por el cual se debe implementar un tratamiento específico y así precautelar la salud de los consumidores a lo largo de los años.

### 1.3. Formulación del problema

¿Cómo rediseñar el sistema de tratamiento de la planta de agua potable El Tambo del Cantón Pelileo, para la remoción de fluoruros?



### ***1.3.1. Problemas específicos***

¿Los métodos identificados para la solución del problema de contaminación por fluoruro serán los idóneos?

¿Será necesario la utilización de cierto tipo de químico para la remoción de fluoruros?

¿Cómo identificar el método que causa menor daño ambiental?

### **1.4. Justificación de la investigación**

La planta de tratamiento El Tambo fue construida por parte del GAD San Pedro de Pelileo para mejorar la calidad de agua que se consumía en el cantón, en los años noventa la importancia que se daba a ese tipo de recurso vital no era de tanta relevancia y los recursos económicos eran destinados para otras necesidades de la población. Además, las normas y multas que regían eran demasiado flexibles; por lo que el tipo de tratamiento que se diseñó en aquellos años era el indicado y cumplía los requerimientos necesarios.

El GAD de San Pedro de Pelileo ha implementado una solución a corto plazo para mitigar este problema; aumentó una nueva fuente de agua la cual tiene una concentración baja de fluoruros en su composición, las mezclas se realizaron en diferentes proporciones para conseguir un nivel de fluoruros por debajo del límite permisible. Sin embargo, esta solución no ha dado el resultado esperado, debido a que los operadores no manipulan adecuadamente las válvulas de ingreso cuando la demanda del agua aumenta considerablemente o cuando ocurren daños en las fuentes de agua, ocasionando que esta segunda fuente de agua no sea suficiente para controlar la concentración de fluoruros en el agua de consumo.

Esta solución a corto plazo fue puesta en marcha en vista de que la municipalidad fue observada por parte del ministerio de ambiente y el ARCOSA en sus inspecciones por incumplir con la norma INEN 1108. En caso de seguir incumpliendo con la normativa, las entidades pueden retirar el permiso de funcionamiento de la planta de tratamiento, lo que ocasionaría que toda la población pelileña se queda sin el suministro de agua potable.

La concentración alta de fluoruros en la fuente de agua objeto de estudio, es por la naturaleza del lugar donde se la extrae (vertiente Jun Jun); ya que ésta absorbe los minerales propios del suelo cambiando su composición original (Mahmoud et al., 2020). En cantidades fuera del límite permisible puede causar serios problemas en la salud de los consumidores como por ejemplo: fluorosis dental (cáncer), indistintamente de la edad (Shanker et al., 2020). El ser humano ingiere flúor normalmente en los alimentos de su ingesta diaria, esta concentración de flúor en el cuerpo se ve afectada cuando consume cantidades excesivas de ciertos alimentos o de agua contaminada (Ruiz, 2017).

Para las entidades gubernamentales encargadas de velar por la salud de su población actual y futura es importante implementar un método efectivo que solucione este problema definitivamente, que no requiera elevada inversión económica y que su aplicación no provoque algún efecto adverso al ambiente. Los métodos aplicados para la remoción de fluoruros son variados, sin embargo, no existe estudio alguno que nos asegure cuál de todos ellos tiene alto porcentaje de remoción y menor costo de inversión.

Por los problemas que se derivan al emplear aguas con altas concentraciones de fluoruro, es importante realizar esta investigación, la cual propondrá mecanismos de remoción viables que mitiguen el problema con el fin de mejorar la calidad del agua y cumplir con todas las normas establecidas por los organismos reguladores.

## **1.5. Objetivos de la investigación**

### ***1.5.1. Objetivo general***

Rediseñar la planta de tratamiento de agua potable El Tambo del Cantón Pelileo, para la remoción de fluoruros.

### ***1.5.2. Objetivos específicos***

- a) Diagnosticar el tratamiento actual de la planta El Tambo con los valores de los parámetros físicos, químicos y microbiológicos resultantes del tratamiento.
- b) Realizar el estudio comparativo a nivel de laboratorio mediante pruebas de tratabilidad de los diferentes métodos aplicados para la remoción de fluoruros: ablandamiento con cal, intercambio iónico, osmosis inversa y alúmina activada.
- c) Obtener los parámetros de diseño del método con mejor eficiencia de remoción de fluoruros.
- d) Dimensionar el sistema de tratamiento de agua potable para la planta El Tambo.
- e) Identificar la factibilidad técnica y económica del diseño para el sistema de tratamiento de agua potable.
- f) Validar el cumplimiento de la norma INEN 1108 en la remoción de fluoruros con la caracterización del agua tratada mediante análisis de laboratorio.

## **1.6. Hipótesis**

### ***1.6.1. Hipótesis general***

El rediseño del sistema de tratamiento de la planta de agua potable El Tambo, del Cantón Pelileo, mejorará la remoción de los fluoruros dejándolos por debajo del límite máximo permisible de 1,5 mg/L.

### ***1.6.2. Hipótesis específicas***

- a) La eficiencia de remoción mínima de fluoruros será del 80% en cada proceso propuesto.
- b) La eficiencia en remoción de fluoruros depende del caudal, tiempo del ciclo y el tipo de resina utilizada.
- c) Al aplicar el tratamiento, el agua cumple con la normativa vigente para agua de consumo humano.

## CAPÍTULO II

### 2. MARCO TEÓRICO

#### 2.1. Antecedentes de la investigación

El tratamiento de aguas residuales, es un proceso considerado dentro de las soluciones sostenibles como altamente significativo para atenuar el problema de escasez de agua a nivel mundial (Damtie et al., 2019), los efluentes de aguas urbanas pueden presentar dentro de sus contaminantes una serie de elementos como arsénico, flúor, zinc, plomo, mercurio, entre otros (Das & Nandi, 2020; Pillai et al., 2020); que mediante procesos programados y ejecutados de manera adecuada puedan eliminarse sin que representen una amenaza a nivel ecológico.

Entre los contaminantes mencionados, el flúor se considera un elemento químico común de gran importancia, que al ser extremadamente reactivo y libremente soluble en agua (Kumari et al., 2020) se presenta en las soluciones acuosas como fluoruro (Grzegorzec et al., 2020). Dentro de las concentraciones adecuadas siendo 1.5 mg/L el límite permisible (NTE INEN 1108, 2011), el flúor puede combatir el deterioro dental, promoviendo la renovación del esmalte dental y la aparición de caries, además de fomentar a nivel sistemático la mineralización de los huesos (Eunice Jayashree et al., 2020). Sin embargo, en cantidades por encima del nivel máximo puede provocar serios problemas de salud en los seres humanos como: fluorosis esquelética, trastornos musculares, deterioro de la función tiroidea, osteosarcoma y muerte celular (del Carmen Armas-Vega et al., 2019; Fordyce, 2019; OMS, 2020).

Los resultados de medición de fluoruros obtenidos en los análisis del agua tratada de la Planta de Tratamiento de Agua Potable El Tambo son 1.96 mg/L (ver tabla 8-4.), mientras que en los análisis realizados al agua de la vertiente (agua cruda) dan como resultado 2.13 mg/L respectivamente; datos que son un promedio de los resultados obtenidos de un monitoreo anual que evidencia la carga contaminante fuera del límite permisible en el agua potable destinada para el consumo y genera preocupación respecto a los riesgos para la salud de los habitantes de no ser atendido el problema.

En la actualidad, las entidades gubernamentales se preocupan en dotar un servicio de calidad al consumidor y cumplir con todos los requerimientos impuestos por los organismos de control en el país (NTE INEN 1108, 2011), no obstante el proceso de tratamiento actual con que cuenta la planta de referencia no es el adecuado para eliminar el contaminante de interés (flúor), como se puede corroborar en los resultados de los análisis de aguas, razón por la que la municipalidad ha

recibido observaciones en las inspecciones continuas a cargo de los organismos de control y es adecuado encontrar un tratamiento óptimo.

Dentro de los métodos de tratamiento que comúnmente son utilizados en la industria, se han considerado opciones que cumplan con los siguientes criterios: remoción del contaminante de una manera eficiente, económicamente rentable y que no cause ningún riesgo paralelo al bienestar ambiental por daños por subproductos (Damtie et al., 2019; He et al., 2020).

Los métodos más utilizados son la precipitación, coagulación química y floculación, así como el intercambio iónico, ósmosis inversa, separación por membrana, técnicas de adsorción (Tao et al., 2020) y otros como electrodiálisis y tratamiento electroquímico (Li et al., 2019; Muddemann et al., 2019).

La adsorción se considera una técnica popular debido a su conveniente aplicación con la consecuente posibilidad de optimización y adición de nuevos materiales (Limousy & Thiebault, 2022). Una gran variedad de adsorbentes para la eliminación de flúor se informan en artículos de investigación, donde se mencionan adsorbentes como la alúmina que resulta ser altamente selectiva para iones fluoruro, sugiriendo la utilización de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  con rendimientos de hasta 98% reportados con compuestos meso porosos de titanio-alúmina (He et al., 2020; Mesfer, 2022), del 92% para preparaciones de calcio y circonio cargadas sobre alúmina activada con ácido (CAZ) (Kumari et al., 2020) y referentes del 74% usando Ce- $\text{AlOOH}$  (boehmita) con ácido oxálico mejorando la capacidad de adsorción regular del material (Tao et al., 2020). Se refiere que los materiales de carbono poroso lograrían mejorar las adsorciones mediante su modificación y dopaje con metales, entre ellos: carbón activado con La/Mg/Si (LMSAC) derivado de la cáscara de la palma para la eliminación simultánea de aluminio y fluoruro de soluciones acuosas, donde la eficiencia de eliminación de flúor alcanzó el 92.6% en la primera hora (Damtie et al., 2019).

Considerando en cada uno de los estudios la influencia de los tratamientos químicos y térmicos en la remoción de fluoruro del agua en base a las estructuras minerales y su caracterización así como la influencia del pH (Corral-Capulin et al., 2018) .

Dentro de la tecnología de separación por membrana, la ósmosis inversa y la nanofiltración (NF/RO) se han evaluado como técnicas que se utilizan juntas debido a sus similitudes, siendo aplicadas para la eliminación de sustancias orgánicas, micro contaminantes e iones multivalentes siendo consideradas las mejores tecnologías de membrana disponibles para obtener agua de alta calidad a partir tanto de fuentes salinas como de aguas residuales (Grzegorzec et al., 2020). Las membranas NF/RO, utilizan varios mecanismos de separación, como la difusión de la solución, la exclusión por tamaño, la repulsión de carga y la adsorción. Cuanto mayor sea el número de

mecanismos de separación, mayor la probabilidad de rechazar varios solutos con distintas propiedades químicas, la aplicación de NF/RO ha reportado una eliminación casi completa de compuestos inorgánicos con resultados de eliminación eficiente de fluoruro incluso en aguas subterráneas salobres con un porcentaje del 75% (Damtie et al., 2019).

Los estudios sobre intercambio iónico refieren que la zeolita de tipo clinoptilolita elimina un 80% de fluoruro del agua (Muhamad et al., 2021), que en concordancia con los resultados establecidos por Grzegorzek et al., (2020) demuestran que las membranas monovalentes de intercambio iónico selectivo permiten disminuir el contenido de fluoruro en el agua con eficiencias altas de entre el 70-90%, alcanzando a controlar la demanda de energía en función de la densidad de corriente así como de la concentración de sal en las soluciones tratadas. Más del 99% de eficiencia de eliminación ha sido alcanzada para adsorbentes de circonio (IV)-hexametildiamina (ZrHMDA) y fosfato de circonio amorfo (AZrP) donde para la eliminación de  $F^-$  se usó el compuesto hasta en 10 ciclos consecutivos sin interrupción (Patnaik et al., 2018) .

Finalmente, para describir las principales variables de la eliminación de fluoruro mediante ablandamiento con cal ha de considerarse que este método va acorde a la necesidad adicional de reducir la dureza en el agua cruda y su eficiencia depende de la temperatura, sabiendo que la generación de lodos puede convertirse en una fuente de contaminación puntual secundaria (Fordyce, 2019). En zonas rurales se han popularizado las técnicas simples de desfluoración, se reportan en bibliografía usos del óxido de magnesio, cal y bisulfato de sodio (Wamalwa Wambu et al., 2017). Adicionalmente, a la remoción de fluoruro, la técnica Nalgonda (Dhadge et al., 2018), emplea sales de aluminio hidratadas con una mezcla previa de cal (CaO) o carbonato de sodio ( $Na_2CO_3$ ) y polvo blanqueador seguido de una mezcla rápida, floculación, sedimentación y filtración. Proceso con el que se ha procurado la eliminación de color, olor y turbidez, así como bacterias y contaminantes orgánicos (Shanker et al., 2020).

En consecuencia la presente investigación adquiere relevancia social, económica y medioambiental en la medida en que va a la par con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS Agenda, 2030): 6.-Agua limpia y saneamiento, 11.-Ciudades y comunidades sostenibles y 12.- Producción y consumo responsables, por cuanto se busca intervenir de manera adecuada y oportuna para garantizar la calidad del agua tratada, garantizando la factibilidad técnica y económica del diseño para el sistema de tratamiento de agua potable y validándolo en concordancia con la norma INEN 1108 para la remoción de fluoruros con la caracterización del agua tratada mediante análisis de laboratorio.

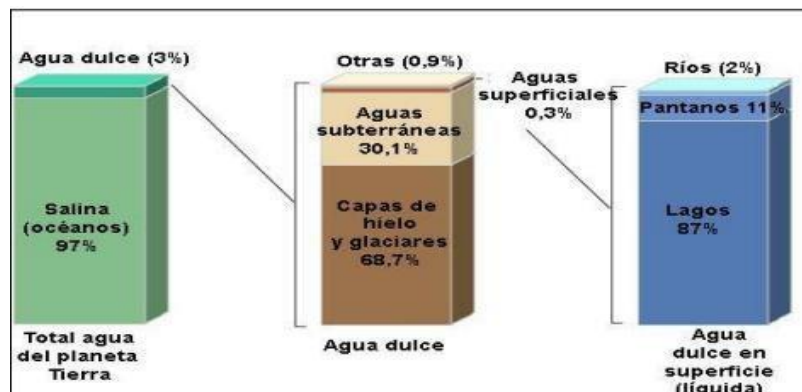
## 2.2. Marco conceptual

### 2.1.1. Aguas subterráneas

Este tipo de “aguas se encuentran bajo tierra formando acuíferos y al escurrirse por el suelo van disolviendo las sales que se encuentra al paso, donde dichas sales pueden ser nocivas a los seres vivos ya sea por su concentración o por su composición. La lenta velocidad de infiltración del agua en el suelo, permite que las partículas orgánicas que inicialmente estaban en suspensión sean retenidas en el camino. De este modo, cuando el agua llega a la superficie su aspecto es cristalino.

En el agua subterránea, generalmente no se encuentran microorganismos patógenos, porque la escasez de oxígeno y de nutrientes evita su desarrollo. Puede decirse que la pureza orgánica y la cantidad de sales minerales de las aguas subterráneas aumenta a medida que aumenta la profundidad de la perforación” (Dell et al., n.d.).

“El agua subterránea es la fuente de agua dulce más abundante en la tierra, abastece casi el 50% del agua potable mundial y 43% de toda el agua utilizada para riego en la agricultura. Los cambios en la disponibilidad y calidad de la misma generan un impacto en la salud del ser humano, los medios de vida, la seguridad alimentaria y el desarrollo económico de las naciones.



**Figura 1-2.** Distribución del agua en el planeta

Fuente: (Burbano et al., 2021).

El agua subterránea representa una fracción importante de la masa de agua presente en todos los continentes, con un volumen mucho más importante que la masa de agua retenida en lagos o ríos y aunque menor al de los mayores glaciares, las masas más extensas pueden alcanzar millones de km<sup>2</sup>” (Burbano et al., 2021).

“Dado que la extracción mundial del agua subterránea se ha triplicado en los últimos 50 años, los niveles han disminuido considerablemente en los principales acuíferos, provocando así la reducción en el caudal de los arroyos y causando la degradación de los ecosistemas de humedales y ribereños. La viabilidad a largo plazo de la economía de las regiones que dependen de la explotación de los acuíferos se encuentra amenazada, generando riesgos a largo plazo para la

seguridad alimentaria mundial. La sobreexplotación de las aguas subterráneas y su contaminación amenazan el abastecimiento de agua potable de cientos de millones de personas” (UICN, 2021).

### **2.1.2. Fluoruros**

El flúor es un elemento reactivo que se encuentra en la atmósfera, la litosfera, la biosfera y la hidrosfera (plantas y animales) en forma de fluoruro. Los minerales fluorados (fluorita, fluorita, fosfato de roca, criolita apatita) se encuentran sobre todo en rocas ígneas y metamórficas, y en menor medida en rocas sedimentarias (Mahmoud et al., 2020).

El flúor es el miembro más ligero de la familia de los halógenos y tiene un radio atómico pequeño. La configuración de electrones de cáscara cerrada del  $F^-$  y su elevada carga nuclear lo convierten en el más electronegativo y reactivo de todos los elementos químicos. Debido a su alta reactividad, el fluoruro no se encuentra en la naturaleza en su estado elemental, sino como fluoruro orgánico (un enlace covalente) o inorgánico (un enlace iónico). Los organismos vivos están expuestos de forma persistente a fluoruros inorgánicos como fluoruro de hidrógeno (HF), fluoruro de calcio ( $CaF_2$ ) y fluoruro de sodio (NaF). El fluoruro entra en el cuerpo de forma natural a través de las partículas del aire, los productos que contienen flúor, como la pasta de dientes y los alimentos, y el agua potable ya que se encuentra en el suministro de agua de la mayoría de las grandes ciudades (Mahmoud et al., 2020).

#### **2.1.2.1. Vías de exposición al fluoruro**

La liberación de fluoruro al medio ambiente se ve facilitada por procesos geológicos (por ejemplo, la meteorización de las rocas, los respiraderos hidrotermales y los volcanes) y por procesos industriales y de fabricación antropogénicos, como el procesamiento del mineral de fosfato, la producción de fertilizantes de fosfato, la combustión de carbón, la fabricación de productos químicos y cerámicos y la producción de vidrio y ladrillos. Según un informe de 2002 del Programa Internacional de Seguridad de las Sustancias Químicas, la liberación de fluoruro en el medio ambiente por procesos humanos procede de las siguientes fuentes El 48% de los fertilizantes fosfatados, el 20% de la producción química, el 19% de la producción de aluminio, el 8% de la producción de acero y petróleo, y el 5% de la quema de carbón. Durante la fabricación de fertilizantes fosfatados a partir de fosfato de roca, se elimina parte del flúor en forma de fluorosilicato, que se purifica mediante un proceso de acidulación

- *Fluoruros atmosféricos:* Los fluoruros atmosféricos más comunes son el fluoruro de hidrógeno (HF) y el fluoruro de sodio (NaF), que juntos constituyen el 75% del fluoruro presente en la atmósfera. El fluoruro se distribuye en la atmósfera a gran distancia a través del viento o la turbulencia atmosférica. La concentración de fluoruro en el aire suele ser



mayor en las zonas donde se producen procesos de fabricación, con concentraciones que oscilan entre 2 y 3 mg/m<sup>3</sup>; disminuyendo a 1,9 mg/m<sup>3</sup> en zonas no industriales. El fluoruro en partículas está presente en forma de fluoruro de aluminio y sodio (criolita), fluoruro de aluminio, fluoruro de calcio, hexafluorosilicato de sodio, fluoruro de plomo fluoruro de plomo (PbF<sub>2</sub>) y fosfato de calcio (fluorapatita).

- *Fluoruro terrestre*: El fluoruro se encuentra en la mayoría de los suelos a partir de la meteorización de minerales comunes del suelo, como la biotita, y de la contaminación por fertilizantes fosfatados. Por lo general, los suelos tienen una concentración de fluoruro que oscila de 20 a 1000 mg/g; sin embargo, los niveles de fluoruro inorgánico aumentan con la profundidad debido a que el fluoruro soluble se lixivia en el suelo durante las lluvias fuertes o las inundaciones, especialmente cuando el suelo es ligeramente ácido (5,5-6,5 pH). Las partículas de fluoruro procedentes del aire permanecen en la superficie de los suelos y se convierten en fluoruros solubles en agua disponibles para las plantas y los animales.
- *Fluoruro hidrosférico*: Las fuentes naturales de agua contienen flúor en concentraciones variables según su ubicación geográfica y la profundidad del agua. El agua de mar suele contener una alta concentración de flúor (1,2-1,5 mg/L). Los lagos y los ríos tienen una concentración de flúor más baja, normalmente inferior a 0,5 mg/L. El agua subterránea puede tener niveles de flúor variables en función de la composición de los minerales, las rocas presentes y sedimentos de origen marino que suelen estar asociados a la actividad geotérmica o volcánica. Las fuentes termales cercanas a las erupciones volcánicas suelen tener concentraciones extremadamente altas de flúor. Es importante señalar que la concentración de calcio endógena a cualquier suministro de agua influye en la disponibilidad de fluoruro libre debido a la formación de complejos FdCa que impiden la acumulación en las aguas subterráneas. Además, las dietas ricas en calcio son útiles para los habitantes de zonas con alto contenido en fluoruro o contaminadas por éste.

#### 2.1.2.2. *Metabolismo del flúor*

El metabolismo del flúor es exquisitamente dependiente del pH; comienza en el tracto gastrointestinal y termina por excreción renal. Cuando se ingiere fluoruro, el 80%-90% se absorbe como complejos de HF en el tracto gastrointestinal (GI) en el estómago y el intestino delgado proximal, donde el pH es muy bajo. La absorción se produce por difusión pasiva y no parece depender de ninguna proteína transportadora específica. La concentración de HF en el tracto gastrointestinal disminuye cuando el pH es de 3,4; así mismo, los aumentos correspondientes del pH refuerzan la concentración de F.

Tras la ingesta, la concentración plasmática de flúor aumenta y alcanza su máximo entre 20 y 60 minutos. La permeabilidad del HF es mayor que la del F, por lo que el fluoruro atraviesa la membrana celular como HF por simple difusión, mientras que el F se une a las proteínas plasmáticas. La concentración media de fluoruro en el plasma es de 0,01 mg/L y rara vez supera los 0,06 mg/L. Si la concentración de flúor ingerida es pequeña, la concentración plasmática de flúor vuelve a la normalidad en 3-6 h. Aproximadamente el 99% del flúor retenido en el organismo se almacena en tejidos calcificados como el hueso, el esmalte y la dentina. En la mayoría de los casos, el resto del F ingerido se excreta. El riñón es el principal regulador de la concentración sistémica de flúor. La ingesta dietética también puede afectar a la absorción de flúor en el organismo. Por ejemplo, la ingesta de sales de calcio, magnesio y aluminio convierte el flúor en un compuesto menos soluble, impidiendo su absorción y eliminándolo a través de la excreción fecal y urinaria. Sin embargo, la ingesta de fosfatos, sulfatos y molibdeno aumenta la absorción de flúor. Otros factores que afectan a la concentración de flúor son el trastorno ácido-base, el hematocrito, la altitud, la actividad física, el ritmo circadiano, las hormonas, la función renal, las predisposiciones genéticas y la dieta (Mahmoud et al., 2020).

**Tabla 1-2.** Límites máximos recomendados de fluoruro por día.

<b>Etapas de la vida</b>	<b>Límite máximo recomendado</b>
Bebés hasta 6 meses	0,7 mg
Bebés de 7 a 12 meses	0,9 mg
Niños de 1 a 3 años	1,3 mg
Niños de 4 a 8 años	2,2 mg
Niños de 9 a 13 años	10 mg
Adolescentes de 14 a 18 años	10 mg
Adultos mayores de 19 años	10 mg
Mujeres y adolescentes embarazadas y en período de lactancia	10 mg

**Fuente:** (National of institutes of Health, 2020)

**Realizado por:** Morales, Lizeth, 2021

El “propósito del nivel óptimo es promover la salud pública; donde la OMS y EPA mencionan:

*La Organización Mundial de la Salud (OMS)* señala que la exposición prolongada al agua potable que contiene más de 1.5 ppm de fluoruro puede provocar problemas de salud. El límite de los lineamientos de la OMS es de 1.5 ppm” (Brazier, 2021).

“*La Agencia de Protección Ambiental (Environmental Protection Agency, EPA)* tiene como objetivo proteger a las personas de la sobreexposición a sustancias químicas tóxicas. Establece el nivel máximo permitido en 4 ppm y un nivel máximo secundario en 2 ppm. Es necesario que se informe a la EPA si los niveles superan las 2 ppm. En áreas donde el agua contiene niveles más altos de fluoruro de forma natural, los sistemas de

agua comunitarios deben asegurarse de que el nivel máximo no supere las 4 ppm” (Brazier, 2021).

### 2.1.2.3. Riegos

La “exposición excesiva al fluoruro se ha relacionado con una serie de problemas de salud.

**Fluorosis ósea:** La exposición excesiva al fluoruro puede provocar una enfermedad ósea conocida como fluorosis esquelética. Esta afección puede provocar dolor y daño en los huesos y las articulaciones durante muchos años.

Los huesos pueden endurecerse y volverse menos elásticos, lo que aumenta el riesgo de sufrir fracturas. Si los huesos se vuelven más gruesos, la acumulación de tejido óseo puede contribuir a una movilidad articular deteriorada.

**Problemas de la tiroides:** En algunos casos, el exceso de fluoruro puede dañar la glándula paratiroidea. Esto puede resultar en hiperparatiroidismo, que implica la secreción incontrolada de hormonas paratiroideas; resultando en un agotamiento de calcio en las estructuras óseas, así como concentraciones de calcio más altas de lo normal en la sangre.

Las concentraciones más bajas de calcio en los huesos hacen que sean más susceptibles a las fracturas.

**Problemas neurológicos:** En 2017, se publicó un informe que sugería que la exposición al fluoruro antes del nacimiento podría conducir a resultados cognitivos deficientes en el futuro.

Al medir los niveles de flúor en 299 mujeres durante el embarazo y en sus hijos entre las edades de 6 y 12 años. Probaron la capacidad cognitiva a las edades de 4 años y entre 6 y 12 años. Los niveles más altos de flúor se asociaron con puntuaciones más bajas en las pruebas de CI (coeficiente intelectual).

En 2014, se documentó el fluoruro como una neurotoxina que podría ser peligrosa para el desarrollo infantil, junto con otras 10 sustancias químicas industriales, como plomo, arsénico, tolueno y metilmercurio.

**Otros problemas de salud:** Según la Academia Internacional de Toxicología y Medicina Oral (IAOMT), una organización que hace campaña contra el uso de fluoruro agregado, también puede contribuir a los siguientes problemas de salud:

- i. acné y otros problemas de la piel
- ii. problemas cardiovasculares, que incluyen arteriosclerosis y calcificación arterial, presión arterial alta, daño miocárdico, insuficiencia cardíaca e falla cardíaca
- iii. problemas reproductivos, como baja fertilidad y pubertad precoz en las niñas

- iv. afecciones que afectan las articulaciones y los huesos, como osteoartritis, cáncer de huesos y trastorno de la articulación temporomandibular (ATM)
- v. problemas neurológicos, que posiblemente conduzcan al TDAH

Una revisión describe el fluoruro como un eliminador extremo de electrones con un apetito insaciable por el calcio. Los investigadores piden que se reconsidere el equilibrio entre riesgos y beneficios” (Brazier, 2021).

### **2.1.3. Tratamientos para la remoción de fluoruros**

“Históricamente, el agua se ha tratado con métodos muy sencillos como hirviéndola, exponiéndola al sol, sedimentándola o filtrándola a través de arena o grava para purificarla, para el consumo humano, éstas han sido algunos de los métodos más utilizados para disminuir y eliminar los residuos e impurezas y a su vez mejorar su aspecto físico (olor, color, sabor y apariencia).

Actualmente, las técnicas para el tratamiento de aguas con fines de consumo y que tienen lugar en plantas de tratamiento, puede clasificarse en:

1. Procesos físicos,
2. Procesos químicos
3. Procesos biológicos

En torno a los procesos físicos se caracterizan por concentrar los contaminantes en evaporación o pasándola por elementos filtrantes. Entre estos destaca: filtración, adsorción, aireación, floculación, clarificación o sedimentación.

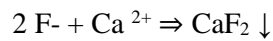
Existe una gran cantidad de sustancias químicas que son utilizadas en los tratamientos para remover contaminantes del agua; y los residuos que generan este tipo de procesos deben recibir tratamientos específicos. Se pueden mencionar: coagulación, desinfección, ablandamiento, oxidación.

Los tratamientos biológicos usan organismos vivos para provocar cambios químicos, tales como: digestión aerobia y digestión anaerobia” (Grijalva Endara et al., 2020).

#### **2.1.3.1. Ablandamiento de agua con cal**

El primer investigador que estudió la forma de eliminar el flúor del agua fue Boruff, químico del State Water Survey of Illinois, quién utilizó la cal, que al precipitarlo arrastraba el flúor por adsorción. Específicamente, el proceso consiste en la transformación de piedra caliza en presencia de agua y ácido carbónico para formar carbonato de calcio, en donde remueve el flúor del agua formando un precipitado insoluble.

“El ablandamiento con cal puede eliminar fluoruros del agua por formación de un precipitado insoluble y por coprecipitación con hidróxido de magnesio [Mg(OH)<sub>2</sub>]. Las reacciones se podrían esquematizar de la siguiente forma:



La coprecipitación ocurre por la adsorción del flúor en el hidróxido magnésico que se forma en el ablandamiento con cal. Si el agua no contiene suficiente magnesio, es necesario enriquecerla, añadiendo sulfato magnésico o cal dolomítica” (Espigares & Pérez, 2010). “La solubilidad relativamente alta del fluoruro de calcio limita la reducción del flúor por ablandamiento solo, logrando reducir altos niveles de flúor a niveles más aceptables” (Fluoruros, 2020).

“La cal en todos sus formatos (cal viva y cal hidratada) y la dolomía calcinada son los productos alcalinos más efectivos y de menor coste en el tratamiento de aguas de consumo, así como aguas residuales y de lodos. De hecho, la mayoría de la cal que se produce se destina a mejorar la calidad del agua que consumimos las personas y las que utilizan las industrias. En este sentido, la cal permite ablandar el agua, purificarla, eliminar su turbiedad, neutralizar la acidez, eliminar impurezas, etc.

Por todas estas ventajas, en las Estaciones de Aguas Potables se utiliza el óxido de calcio (CaO) y el hidróxido de calcio (Ca(OH)<sub>2</sub>). La dolomía calcinada (CaO MgO), también suele emplearse en algunas plantas de tratamiento, por ejemplo, para eliminar la sílice del agua. Este método es el más común, puesto que el magnesio de la dolomía ejerce como principal agente reactivo en la eliminación de la sílice.

Gracias al uso de la cal, en estas plantas de tratamiento de aguas, se consigue, entre otras cosas, reducir el sabor, olor y color del agua al eliminar la materia en suspensión y, por tanto, la turbiedad de la misma. Además, se elimina el manganeso, los fluoruros y los taninos orgánicos del agua, así como la anteriormente mencionada sílice” (S.N, 2017). “El exceso de dióxido de carbono debe eliminarse antes del ablandamiento, ya que puede evitar la precipitación de cal.

### **Ventajas**

- i. Este proceso puede eliminar el exceso de hierro y fluoruro.
- ii. Debido al alto nivel de pH, las bacterias y los virus pueden eliminarse mediante este proceso
- iii. La corrosión y la formación de depósitos se pueden controlar con este método si se realiza de forma adecuada.

### **Desventajas**

- i. Produce una cantidad considerable de fangos que deben eliminarse.
- ii. La incorporación de sosa puede afectar a los niveles de sodio presentes en el agua.

- iii. La recarbonatación o la reintroducción de dióxido de carbono debe realizarse después del ablandamiento para reducir los niveles de pH, con el fin de eliminar el exceso de cal y facilitar la precipitación de los restos de carbonato de calcio.
- iv. Este proceso no puede reducir la dureza por completo.
- v. Este proceso requiere un alto grado de conocimientos por parte del operario para su control” (HACH, 2020).

#### 2.1.3.2. *Alúmina activada*

“La alúmina activada es un alótropo del óxido de aluminio, en forma de material granular altamente poroso, se usa en el tratamiento de agua en el punto de entrada o punto de uso para remover arsénico y excesos de iones de flúor.

La alúmina activada absorbe contaminantes en lugar de filtrarlos, la remoción es una combinación entre adsorción con intercambio iónico. El procedimiento consiste en hacer pasar agua a través de una columna rellena con este material y la efectividad del proceso depende del contaminante, las características de la alúmina, el diseño del dispositivo y la calidad del agua” (Grijalva Endara et al., 2020).

La alúmina activada puede ser un método de tratamiento efectivo para el agua natural con un alto nivel de contaminantes. Sin embargo, un serio inconveniente es que su regeneración requiere el uso de soluciones de ácido y base que son indeseables para el almacenamiento y manejo en el hogar.

Los dispositivos de alúmina activados contienen un lecho compacto de gránulos de alúmina activados. A medida que el agua pasa a través del dispositivo, ciertos contaminantes se adsorben a los gránulos de alúmina activados. Por ejemplo, bajo ciertas circunstancias la cloración del agua antes del tratamiento con alúmina activada convertirá el arsénico en la forma más probable de ser adsorbido por la alúmina activada.

La aplicación de óxidos metálicos alcalinos o de tierras raras sobre la alúmina precursora aumenta la naturaleza electropositiva de la alúmina. También implica que los adsorbentes a base de alúmina modificada tienen las características de adsorción acumuladas de la alúmina y de los óxidos metálicos cargados externamente. La activación con ácido sulfúrico crea una superficie adicional significativa para la alúmina, lo que dio lugar a una eliminación eficaz del fluoruro. Por lo tanto, la carga de otros óxidos metálicos en la alúmina activada con ácido sulfúrico para mejorar la deposición de óxidos metálicos en las superficies adicionales generadas. Esto podría proporcionar más sitios activos para que el adsorbato sea capturado (Kumari et al., 2020).

**Tabla 2-2.** Elemental composition of fresh alúmina.

Material	Al (%)	O (%)	Si (%)	Na (%)	Ca (%)	S (%)	Fe (%)	Zn (%)	Cl (%)	P (%)	Otros (%)
Fresh Alúmina	51,8	46,9	0,3	0,5	0,1	0,2	0,1	0,03	0,04	0,003	0,03

Fuente: (Kumari et al., 2020).

Realizado por: Morales, Lizeth, 2021

La adsorción es una técnica muy popular debido a su cómoda aplicación su bajo coste, su carácter respetuoso con el medio ambiente y la ausencia de subproducto nocivo. La alúmina es barata y altamente selectiva para los iones fluoruro.

La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos también ha sugerido la utilización de  $Al_2O_3$  para la desfluorización. Sin embargo, el inconveniente de la aplicación de la alúmina es su baja capacidad de adsorción. Por lo tanto, se intentó modificar la alúmina para superar esta deficiencia; los intentos de mejorar la propiedad de adsorción de la alúmina fueron la activación ácida mediante los ácidos sulfúrico y clorhídrico. Además, también se ha intentado cargar óxidos metálicos múltiples en la alúmina para mejorar la propiedad de adsorción.

El fluoruro se agrupa como una base dura debido a su pequeño tamaño iónico y su propiedad de alta electronegatividad. En consecuencia, es atraído fuertemente hacia los iones eléctricamente positivos como  $Mg^{2+}$ ,  $Mn^{4+}$ ,  $Fe^{2+}$ ,  $La^{3+}$ , etc. Por lo tanto, la carga de tales cationes en los adsorbentes precursores, como la alúmina o el carbono, aumenta la naturaleza electropositiva del adsorbente precursor que atrae más iones F. Los cationes metálicos mencionados anteriormente actúan como puente entre los iones fluoruros adsorbidos y la superficie del adsorbente.

La aplicación de metales de tierras raras ( $La^{3+}$ ,  $Ce^{4+}$ ,  $Y^{3+}$ , etc.) en cualquier precursor mejora la capacidad de adsorción de fluoruros. Sin embargo, el resultado es el aumento del coste global del adsorbente. Por lo tanto, el zirconio, que es comparativamente barato, insoluble en un amplio rango de pH y posee una gran capacidad de adsorción con una alta afinidad hacia los iones fluoruro, es investigado ampliamente para la desfluorización.

Actualmente los avances investigativos muestran mejoras en el potencial de desfluoración de la alúmina cargando otros óxidos metálicos para modificar su propiedad de adsorción superficial. Estos óxidos metálicos modifican los adsorbentes de alúmina, como la alúmina modificada con lantano, la alúmina recubierta con óxido de manganeso, la alúmina activada recubierta con dióxido de manganeso, la alúmina activada modificada con magnesio, la alúmina recubierta con óxido de manganeso hidratado y alúmina modificada con óxido de cobre; han mostrado un potencial de desfluorización prometedor y mejorado con la alúmina no modificada (Kumari et al., 2020).

### Pretratamiento:

“El éxito del tratamiento con alúmina activada depende del pH. En general, el pH del agua debe ser inferior a 8.5. Para el fluoruro, un pH entre 5 y 6 es óptimo. Para el arsénico, se recomienda un pH de 7. El pretratamiento para reducir el pH puede ser necesario para que la alúmina activada sea efectiva.

Cuando el agua no tratada contiene sólidos en suspensión, un pretratamiento con un cartucho de 5 micras filtro de sedimentos es necesario para evitar la obstrucción de la capa de alúmina activada” (S.N, 2018).

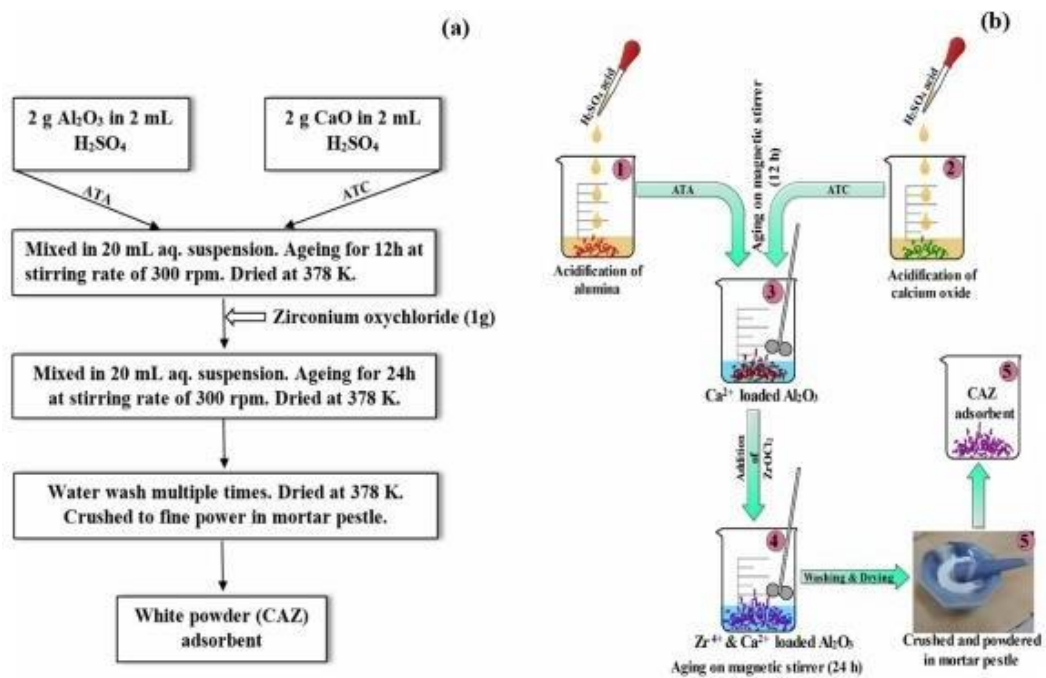


Fig. 1. Flow chart of adsorbent preparation in (a) block diagram and (b) sketched diagram.

### Figura 2-2. Preparación del Adsorbente

Fuente:(Kumari et al., 2020).

#### 2.1.3.3. Intercambio iónico

En el agua podemos encontrar iones cargados eléctricamente; denominados a los de carga positiva cationes y a los de carga negativa, aniones. “El agua es eléctricamente neutral, caso contrario sufriríamos un choque eléctrico cuando sumergimos nuestra mano en el agua, el número de cargas positivas y negativas debe ser exactamente igual” (Dardel, 2020).

“La transferencia de iones es un proceso rápido y reversible en el cual los iones impuros presentes en el agua son reemplazados por iones que despiden una resina de intercambio de iones. Los iones



impuros son tomados por la resina que debe ser regenerada periódicamente para restaurarla a su forma iónica original. Una reacción de intercambio iónico es aquella en la cual un átomo o una molécula que han ganado o perdido un electrón, y que por lo tanto adquiere una carga positiva o negativa, se intercambia por otra partícula de igual signo, pero de naturaleza diferente. Esta última partícula inicialmente está ligada a la superficie de un cuerpo sólido inerte y pasa a solución y su lugar es ocupado por otra partícula que queda retenida (temporalmente) en la superficie del polímero o soporte” (Agamez Salvador, 2014).

A continuación, se muestra los contaminantes que se pueden eliminar por intercambio iónico, y algunos otros que necesitan otros procesos:

**Tabla 3-2.** Contaminantes eliminados por intercambio iónico.

<b>CONTAMINANTE</b>	<b>COMENTARIOS</b>	<b>ELIMINACION POR INTERCAMBIO IONICO</b>
<b>Dureza</b>	No hay un límite recomendado para la dureza del agua potable. El ablandamiento es más bien un asunto de comodidad.	El proceso es un ablandamiento normal, con resinas especialmente desarrolladas para tratar agua potable.
<b>Nitrato</b>	El nitrato no es un problema para adultos, pero es nocivo para niños de pecho. El límite recomendado es 50 mg/L como máximo.	El nitrato se elimina con resinas selectivas especiales.
<b>Boro</b>	El ácido bórico se encuentra en permeados de ósmosis inversa tratando agua de mar, así como en aguas subterráneas de algunas regiones del mundo. El límite recomendado es 1 mg/L.	El boro se elimina con resinas selectivas especiales.
<b>Plomo</b>	La presencia excesiva de plomo puede ser debida a tuberías antiguas hechas con este metal pesado.	El plomo se puede eliminar con resinas débilmente ácidas. El ablandamiento también elimina plomo.
<b>Bario</b>	El bario es un componente raro de la dureza, y forma sales altamente insolubles. El límite recomendado por la OMS es 0.7 mg/L.	Las resinas fuertemente ácidas (sulfónicas, SAC) tienen una alta selectividad por el bario.
<b>Cromato</b>	La presencia de cromato en las capas freáticas es debida a poluciones industriales. El límite recomendado es 50 µg/L, como Cr(VI).	Se emplean resinas débilmente básicas especiales (WBA) para eliminar cromato.

<b>Uranio</b>	La toxicidad de uranio no está relacionada con su radiactividad; es puramente química. La recomendación de la OMS es menos de 15 µg/L.	Uranio (VI) está presente en la naturaleza en forma del ion uranilo $UO_2^{++}$ y se elimina con un intercambiador débilmente (WBA) o fuertemente (SBA) básico.
<b>Otros metales pesados</b>	Metales pesados se pueden encontrar en aguas subterráneas, naturalmente o como resultado de la polución.	Muchos metales se pueden eliminar mediante el uso de resinas complejas, pero no se les permite en todos los países.
<b>Arsénico</b>	El As se encuentra en ciertas aguas naturales. El límite recomendado es 10 µg/L.	No hay procesos seguros de intercambio iónico para eliminar arsénico. Se pueden usar otros substratos tales como hidróxido de hierro granulado o dióxido de titanio.
<b>Fluoruro</b>	Capas freáticas pueden contener fluoruros resultantes de la producción industrial de aluminio. El límite recomendado por la OMS es 1.5 mg/L.	Las resinas intercambiadoras de aniones tienen una selectividad baja para el ion $F^-$ , de manera que no existen procesos eficaces por intercambio iónico. El proceso común usa alúmina activada.
<b>Materias orgánicas</b>	Ciertas materias orgánicas naturales (NOM), en particular aquellas produciendo color, pueden eliminarse por intercambio iónico.	Las resinas utilizadas en este caso son intercambiadores fuertemente básicos en forma $Cl^-$ . Se regeneran con cloruro de sodio.

Fuente: (Dardel, 2020).

Realizado por: Morales, Lizeth, 2021

#### *Eliminación de contaminantes iónicos:*

Proceso utilizado para “eliminar los contaminantes iónicos disueltos en el agua. El proceso de intercambio se produce entre un sólido (resina o zeolita) y un líquido (agua). En el proceso, los compuestos menos deseados se intercambian por aquellos que se consideran más deseables. Estos iones deseables se cargan en el material de resina. Estas resinas se pueden utilizar solas o en conjunto para eliminar los contaminantes iónicos del agua.

En el intercambio de cationes durante el tratamiento del agua, los iones cargados positivamente que entran en contacto con la resina de intercambio iónico se intercambian con iones cargados positivamente disponibles en la superficie de la resina, generalmente sodio.

En el proceso de intercambio de aniones, los iones cargados negativamente se intercambian con iones cargados negativamente en la superficie de la resina, generalmente cloruro. Varios contaminantes incluyendo nitrato, flúor, sulfato y arsénico- pueden ser eliminados por intercambio de aniones.

En comparación con otras tecnologías, como la electrodesionización continua (CEDI), la cromatografía, ultrafiltración, y tratamientos biológicos, el intercambio iónico es particularmente adecuado cuando se intenta eliminar un contaminante específico de baja concentración, por ejemplo, la eliminación de boro del agua de pozo.

#### *Resinas de recarga*

Los materiales de resina tienen una capacidad de intercambio finito. Cada uno de los sitios de intercambio individuales se llenará con un uso prolongado. Cuando no pueda intercambiar iones por más tiempo, la resina debe ser recargada o regenerada para restaurarla a su condición inicial. Las sustancias utilizadas para esto pueden incluir cloruro de sodio, así como ácido clorhídrico, ácido sulfúrico, o hidróxido de sodio.

La sustancia primaria que queda del proceso se llama “regenerante gastado”. Contiene no sólo todos los iones eliminados, sino también cualquier ion regenerador adicional, y también tendrá un alto nivel de sólidos disueltos totales. El regenerante se puede tratar en una instalación municipal de efluentes, pero las descargas pueden requerir supervisión.

La eficacia del intercambio de iones para el tratamiento de aguas se puede limitar por la eliminación de sarro mineral, obstrucciones de superficie y otros problemas que contribuyen a ensuciar la resina. Los procesos del tratamiento previo tales como filtración o adición de productos químicos pueden ayudar a reducir o a prevenir estas ediciones” (News, 2021).

#### *2.1.3.4. Ósmosis inversa*

La ósmosis inversa se utiliza cada vez más en el suministro de agua potable para el tratamiento de fuentes de agua dulce que pueden dar como resultado directamente agua de alta calidad. En la práctica, la ósmosis inversa nunca se aplica directamente sobre fuentes de agua dulce, principalmente debido a la aparición de incrustaciones en las membranas. Las estrategias para controlar el ensuciamiento de la membrana en ósmosis inversa sin un pretratamiento costoso y extenso incluyen una operación de bajo flujo, un aumento de las velocidades de flujo cruzado y una limpieza hidráulica mejorada (periódica) (Cornelissen et al., 2021).

“La ósmosis inversa consiste, simplemente, en invertir este proceso natural aplicando la tecnología y el conocimiento. Se trata de producir una presión exterior, que sea superior a la presión osmótica natural, que permita que el agua con mayor concentración de sólidos disueltos atraviese la membrana y pase a la zona donde está la solución más diluida. Así conseguimos separar el agua pura de todos los demás elementos que están disueltos en ella. La presión osmótica que deberemos aplicar va dependiendo del género de soluto y de su concentración, de forma que

el líquido que conseguiremos tras el paso por la membrana va a estar libre tanto de sólidos disueltos como de microorganismos de los que queremos prescindir.

El sistema de ósmosis inversa familiar es el que se emplea para obtener la mejor agua para el consumo humano. Para ello, se emplea una membrana a través la que hacemos circular el agua. La membrana permitirá el paso de las moléculas de agua pura a través de ella y esta agua será llevada a un depósito de acumulación para entonces ser consumida. El agua excedente con todas las partículas que contenía el agua será llevada directamente al desagüe. Con este sistema de tratamiento del agua vamos a poder separar casi el 100 por cien de las sales disueltas, de los sulfatos, de los fluoruros, de los nitratos y de las bacterias, virus y hongos. La membrana de la ósmosis inversa es de naturaleza micro porosa, por lo que bloquea las impurezas.

Gracias a las investigaciones en los materiales para las membranas, se ha conseguido en los últimos tiempos un notable avance en la efectividad de los sistemas de filtrado que permiten la separación de sustancias tanto orgánicas como inorgánicas con tamaños poco a poco más pequeños, con lo que la mejora en la calidad final del agua es notable. Frecuentemente las membranas de ósmosis inversa están en un contenedor al que se le denomina módulo de osmosis inversa. Este contenedor debe estar fabricado con unos determinados materiales, en tanto que tiene que soportar grandes presiones, por lo cual debe ser muy resistente. En estos contenedores distinguiremos claramente la toma para el agua de entrada, una toma para el agua osmotizada y una salida para los concentrados” (Descalcificador, 2017).

La nanofiltración (NF) y la ósmosis inversa (RO) están ampliamente establecidas en la desalinización del agua, la reutilización del agua, así como en el tratamiento de aguas superficiales y subterráneas. El hecho de que una membrana utilice la ósmosis inversa o la nanofiltración depende del proceso en que se utilice la membrana. En los casos en los que se requiere evitar la presión osmótica, se suelen utilizar membranas NF, mientras que la RO utiliza principalmente el proceso osmótico para la separación de solutos mediante una membrana semipermeable. Las membranas de nanofiltración ofrecen un flujo más rápido con requisitos de presión y de energía más bajos porque tienen poros más grandes que las membranas de ósmosis inversa y, en consecuencia, muestran relativamente menos rechazo. La ósmosis inversa se utiliza ampliamente en agua de mar, agua salobre, y la NF se utiliza principalmente en el tratamiento de aguas residuales industriales utilizando las membranas compuestas de poliamida de película delgada comúnmente disponibles. La ósmosis inversa es la tecnología de desalinización más eficiente desde el punto de vista energético y rentable para la desalinización, con una energía mínima teórica de hasta 1,06 kW energía de hasta 1,06 kWh/m<sup>3</sup> y un coste energético alcanzable de aproximadamente 1,8 kWh/m<sup>3</sup> con una recuperación del 50%. El mayor rechazo de solutos se puede conseguir con membranas NF/RO, ya que utilizan varios mecanismos de separación como

la difusión de la solución, la exclusión por tamaño, la repulsión de carga y la adsorción. Cuanto mayor sea el número de mecanismos de separación, mayor será la probabilidad de rechazar varios solutos con características químicas distintas. La aplicación de la NF/RO para la eliminación casi completa de inorgánicos y orgánicos ha sido probada tanto a escala de laboratorio como de campo desde su innovación. Además, estos procesos se utilizan ampliamente para la eliminación de fluoruro de varias fuentes de agua contaminadas.

Las características isomórficas de los iones fluoruro y los iones hidroxilo han atraído la atención hacia el estudio de los mecanismos de eliminación de los medios acuosos. La aplicación de la NF para la eliminación de los fluoruros es técnica y económicamente viable porque, a diferencia de la RO, es más adecuada para producir agua potable directamente, sin necesidad de remineralización. Su innovación en 1980 fue el resultado de un ensayo para identificar una membrana de RO de baja presión y alto flujo. La nanofiltración presenta propiedades entre la ósmosis inversa y la ultrafiltración y, en consecuencia, requiere menos energía por sus menores requisitos de presión y tiene unos costes de inversión, funcionamiento y mantenimiento relativamente bajos. También tiene un flujo de permeado relativamente mayor y una mayor retención de materia cargada que el proceso de ósmosis inversa.

*Osmosis directa:* La eliminación de los fluoruros de diferentes fuentes de agua también puede lograrse utilizando la tecnología FO. La ósmosis directa (FO) ha ganado mucha atención en la tecnología de membranas como un proceso de desalinización potencialmente rentable para hacer frente a la escasez de agua en todo el mundo. La FO funciona basado en la diferencia de presión osmótica para separar dos soluciones a través de una membrana semipermeable. Las moléculas de agua migran espontáneamente entre una solución altamente concentrada (solución de extracción) y una solución diluida (solución de alimentación), a través de la membrana semipermeable de baja a alta presión osmótica en ausencia de una presión hidráulica externa. Debido a este principio, el consumo de energía en la FO es considerablemente bajo. Otra ventaja de aplicar una baja presión de funcionamiento en el proceso de FO es la mínima tendencia al ensuciamiento, lo que reduce la frecuencia del proceso de limpieza y posiblemente prolonga la vida útil de la membrana. Esto hace que la FO sea una perspectiva potencial en aguas y aguas residuales que contienen iones de metales pesados. Actualmente, las membranas poliméricas se utilizan con mayor frecuencia, especialmente en tratamiento de aguas y desalinización, a pesar de sus inconvenientes, como la estabilidad a temperaturas elevadas y el ensuciamiento.

La principal ventaja del proceso de FO es un equipamiento de infraestructura relativamente simple; además, el proceso se ve insignificamente afectado por los contaminantes de la solución de alimentación (Muhamad et al., 2021).

### **2.3. Método para determinar la concentración de fluoruro**

En los ensayos experimentales de cada uno de los procesos propuestos se realizó mediciones tanto en al agua cruda como tratada aplicando el método HACH 8029 el cual es: en celdas cuadradas de vidrio de 10 ml se coloca 10 ml de agua desionizada (blanco) y 10 ml de la muestra a analizar, se coloca 2 ml del reactivo SPANDS en cada una de las celdas, con movimientos circulares se las homogeniza y se inicia el temporizador por 1 minuto. Una vez transcurrido el tiempo se coloca en el espectrofotómetro DR3900 – programa 190 - longitud de onda: 580 nm, la celda con agua ionizada y se ajusta a cero, luego colocamos la celda con la muestra para la medición (Hach, 2000).

“El método HACH 8029 normalizado según el Standard Methods 4500F-B,D; una porción del reactivo se disocia en un complejo incoloro aniónico ( $ZrF_6^-$ ), a razón de que la concentración de fluoruros es mayor, el color que se produce es de menor intensidad, característicamente varía en un tono rojizo oscuro hasta volverse más claro, satisfaciendo la ley de Beer pero de manera inversa, utilizando como blanco agua desionizada el color se torna en un tono más fuerte al de la muestra con el analito a una longitud de onda de 580 nm, el resultado que se obtiene registra el valor directamente en mg/L y absorbancia” (Tirado Poveda, 2019).

### **2.4. Parámetros de control de calidad con respecto a la normativa vigente**

Para asegurar la calidad del agua potable que consume el cantón Pelileo, instituciones públicas se encargan de inspeccionar y vigilar a las entidades públicas que brindan el servicio, apliquen las normativas legales vigentes en el país entre las cuales está el Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio de Ambiente, Libro VI, Anexo 1, Tabla 1. Límites máximos permisibles para aguas de consumo humano y uso doméstico, que únicamente requieren tratamiento convencional y la norma técnica ecuatoriana INEN 1108-2020 sexta revisión: Agua para consumo humano, requisitos, Tabla 1. Requisitos físicos y químicos del agua para consumo humano, Tabla 2. Requisitos microbiológicos del agua para consumo humano y la Tabla B1. Rango de pH del agua para consumo humano. De los parámetros que se presentan en las tablas solo se consideran los relacionados con los contaminantes de la muestra a tratar, por lo tanto, los parámetros generan resultados analíticamente relevantes.

### **2.5. Bases teóricas**

**Espectrofotómetro:** “El espectrofotómetro consigue hacer visible todo el rango a medir, desde el infrarrojo hasta el ultravioleta. El espectrofotómetro puede analizar mejor los valores de reflectancia y calcular posibles variaciones de color entre dos puntos. El sensor de una fotocélula reconoce el espectro cromático en un determinado rango y lo procesa” (PCE, 2020).

**Membrana semipermeable:** “Las membranas semipermeables, que dejan pasar selectivamente el solvente e impiden el paso a los solutos, desempeñan un papel clave en el proceso. Las primeras estaban fabricadas con acetato de celulosa, pero después las de poliamida han desplazado a las primeras, al permitir controlar el tamaño de poro y la permeabilidad.

Las membranas son poco permeables a los iones y a las moléculas con cargas electrostáticas; a mayor carga, mayor será la retención. Por el contrario, los gases disueltos (oxígeno, dióxido de carbono, cloro, etc.) tienen una buena permeabilidad, igual que las moléculas orgánicas neutras de bajo peso molecular” (Condorchem, 2020).

**Standard methods for the examination of water and wastewater:** métodos utilizados para análisis de laboratorio desarrollados por organismos de normalización reconocidos nacional e internacionalmente.

**Total de sólidos disueltos:** “es una medida de la cantidad de material disuelto en el agua. Este material puede incluir los siguientes: carbonato, bicarbonato, cloruro, sulfato, fosfato, nitrato, calcio, magnesio, sodio, iones orgánicos, y otros iones. Ciertos niveles de estos iones en el agua son necesarios para la vida acuática. Los cambios en concentraciones del TDS pueden ser dañinos debido a que la densidad del agua determina el flujo del agua hacia y desde las células de un organismo. Sin embargo, si las concentraciones del TDS son demasiado altas o demasiado bajas, el crecimiento de la vida acuática puede ser limitado, y la muerte puede ocurrir” (News, 2021).

**Vertiente:** “se le suele llamar vertiente al escape de agua a la superficie de las napas subterráneas” (EDUCALINGO, 2018).

**Adsorción:** “es un proceso donde átomos o moléculas quedan adheridos en las paredes de un material poroso. (Chan, 2021) Involucra transferencia de masa de un gas o líquido a la superficie de un sólido” (Silva & Fernández, 2021).

**Adsorbente:** “material sólido con capacidad de adsorción. Los adsorbentes de acuerdo a su naturaleza son selectivos a los solutos” (Silva & Fernández, 2021).

**Adsorbato:** moléculas gaseosas o líquidas que van a ser adsorbidas.

**Fisisorción:** “acción de las fuerzas intermoleculares y las atracciones electrostáticas entre el material y la solución acuosa, por lo tanto, las moléculas no se adsorben en sitios específicos lo que permite que interactúen libremente sobre la superficie del adsorbente”. (Tirado Poveda, 2021)

**Quimisorción:** se caracteriza por la especificidad para formar complejos superficiales entre el adsorbente y las moléculas del adsorbato este proceso suele ser generalmente irreversible.

## CAPÍTULO III

### 3. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

#### 3.1. Metodología

##### 3.1.1. Tipo y diseño de investigación

La investigación realizada es de tipo experimental no científica, debido a que se manipula las variables independientes en cada uno de los ensayos a nivel de laboratorio para lograr obtener los resultados deseados que son reflejados en la variable dependiente. Además, se la considera no científica porque se van aplicar métodos de investigaciones previas para corroborar la eficiencia indicada en las condiciones actuales de investigación.

El diseño es de tipo longitudinal, por las diferentes mediciones que se toman en los ensayos de laboratorio en un período de tiempo de una misma muestra. Con todo esto, obtendríamos resultados de los cambios que se pueden generar en las muestras con el paso del tiempo.

#### 3.2. Enfoque de la investigación

La investigación tiene un enfoque cuantitativo ya que los datos obtenidos de los diferentes ensayos de laboratorio tendrán magnitudes en mg/L, son continuos tomando valores de concentración y discretos pues serán cantidades enteras exactas.

#### 3.3. Métodos de investigación

En principio esta investigación es de tipo deductivo porque extraemos valores y conclusiones de investigaciones anteriores realizadas con altas eficiencias en la remoción de fluoruros en diferentes tipos de agua, para obtener los métodos específicos que nos ayudarán a resolver el problema de investigación. Además, también esta investigación es de tipo sintética debido a que se va integrar todos los datos de valores experimentales, reactivos, composiciones, conclusiones etc. obtenidos con anterioridad de los diferentes métodos aplicados en la remoción de fluoruros, para identificar el método idóneo que disminuirá la concentración de fluoruros en el agua a tratar.

#### 3.4. Identificación de las variables

##### 3.4.1. Variable dependiente

- a) Concentración de fluoruros (remoción).

##### 3.4.2. Variable independiente

- a) Concentración de fluoruros (inicial).
- b) Caudal.
- c) Materia orgánica.



d) Cantidad microbiológica.

### 3.5. Operacionalización de variables

A continuación, se describe cada una de las variables identificadas para este estudio a fin de especificar su relación con el objetivo general.

**Tabla 4-3.** Operación de variables

<b>Variables</b>	<b>Definición</b>	<b>Dimensión</b>	<b>Indicador</b>	<b>Ítem</b>	<b>Instrumento</b>
Concentración de fluoruros	Cantidad de iones fluoruros contenidos en determinada cantidad de agua	< 1,5 mg/L	Límite máximo permisible - NORMA INEN 1108	F <sup>-</sup> mg/L	Espectrofotómetro
Caudal	Cantidad de fluido que circula por una sección	L/s	-	continuo	Caudalímetro
Materia orgánica	Está compuesta por partículas macroscópicas, coloidales o macromoléculas disueltas.	mg/L	TULSMA, libro VI, anexo 1, tabla 1. Límites máximos permisibles para aguas de consumo humano y uso doméstico, que únicamente requieren tratamiento convencional.	COT mg/L	Espectrofotómetro
Cantidad microbiológica.	Especifica la cantidad de bacterias y microorganismos presentes.	ufc/ml	Límite máximo permisible - NORMA INEN 1108	ufc/ml	Filtro al vacío

Realizado por: Morales, Lizeth, 2021

### 3.6. Matriz de consistencia

En esta matriz se resumen de forma general los elementos básicos del proyecto de investigación.

**Tabla 5-3.** Matriz de consistencia

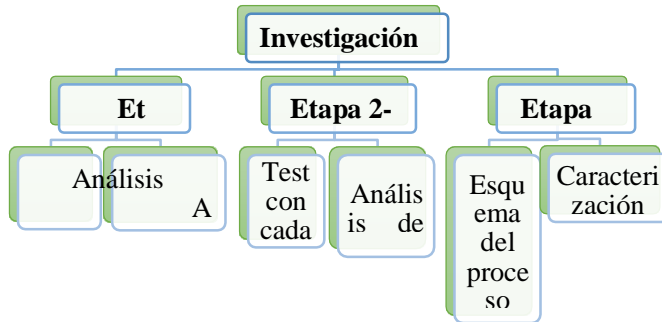
Formulación del problema		Objetivo general			Hipótesis general	
¿Cómo rediseñar el sistema de tratamiento de la planta de agua potable “el tambo” del Cantón Pelileo, para la remoción de fluoruros?		Rediseñar el sistema de tratamiento de la planta de agua potable “el tambo”, del Cantón Pelileo, para la remoción de fluoruros.			El rediseño del sistema de tratamiento de la planta de agua potable “el tambo”, Cantón Pelileo, mejorará la remoción de fluoruros dejándolos por debajo del límite máximo permisible de 1,5 mg/l.	
Preguntas directrices	Objetivo específico	Hipótesis específica	Variables	Indicadores	Técnicas	Instrumentos
¿Cuál es la importancia de esquematizar el tratamiento base de la planta El Tambo con los valores de los parámetros?	a) Diagnosticar el tratamiento base de la planta El Tambo con los valores de los parámetros físicos, químicos y microbiológicos resultantes del tratamiento.	a) La eficiencia de remoción mínima de fluoruros será del 80% en cada proceso propuesto.	Concentración de fluoruros	Límite máximo permisible en la NORMA INEN 1108 - 2020	Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater	Espectrofotómetro UV VIS II MN
¿Cómo influye la comparación de los diferentes métodos para la remoción del fluoruro?	b) Realizar un estudio comparativo de los diferentes métodos aplicados para la remoción de fluoruros: ablandamiento con cal, intercambio iónico, osmosis inversa, alúmina activada.	b) Entre los métodos comparados identificamos el método más eficiente.	Porcentajes de remoción	Pruebas de tratabilidad	Analítica	Filtro al vacío, test de jarras.

¿Cuál es el método con mejor porcentaje de remoción de fluoruros y el de menor costo de inversión?	c) Identificar el método con mejor porcentaje de remoción de fluoruros y el de menor costo de inversión.	c) La eficiencia en remoción depende del caudal, pH y el tipo de la resina utilizada.	Concentración de contaminantes	TULSMA, libro VI, anexo 1, tabla 1.	Analítica	Espectrofotómetro UV VIS II MN
¿Cuál es el beneficio de comprobar el cumplimiento de la norma INEN 1108 con la caracterización del agua tratada mediante análisis de laboratorio?	d) Comprobar el cumplimiento de la norma INEN 1108 con la caracterización del agua tratada mediante análisis de laboratorio.	d) Al aplicar el tratamiento el agua cumple con la normativa vigente para agua de consumo humano.	Análisis de laboratorio	Límite máximo permisible en la NORMA INEN 1108 - 2020	Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater	Espectrofotómetro UV VIS II MN

Realizado por: Morales, Lizeth, 2021

### 3.7. Diseño de la investigación

Esta investigación se divide en etapas a cumplir dentro de la primera se realiza el diagnóstico, como segunda etapa las pruebas de tratabilidad y como última etapa diseño final, en el siguiente diagrama se especifica más a detalle cada etapa.



**Figura 3-3.** Pasos de la investigación  
Realizado por: Morales, Lizeth, 2022

### 3.8. Población de estudio

La población de estudio en esta investigación es la Planta de Tratamiento de Agua Potable “El Tambo” ubicada en el barrio del mismo nombre en la ciudad de Pelileo, lugar de donde se recolectará las muestras para el estudio.

#### 3.8.1. Ubicación de la planta



**Figura 4-4.** Ubicación de la planta El Tambo  
Fuente: Google mapas  
Realizado por: Morales, Lizeth, 2022

### **3.9. Unidad de análisis**

La unidad de análisis es agua de la Planta de Tratamiento de Agua Potable “El Tambo” de la ciudad de Pelileo.

### **3.10. Selección de la muestra**

Para la selección de la muestra se van a tomar muestras de días con diferentes condiciones climáticas por su completa influencia en la composición del agua a tratar. Se tomará dos muestras simples por cada día para los ensayos, en la mañana y tarde, las mismas que serán homogenizadas y mezcladas para darnos lugar a una muestra compuesta. Finalmente se recolectará muestras simples del agua tratada para una comparación entre ambas al aplicar los métodos de remoción de fluoruros.

### **3.11. Tamaño de muestra**

En esta investigación no se utilizará la fórmula para determinar el tamaño de la muestra, sino que se considerará el cien por ciento de la muestra, porque la población es pequeña.

### **3.12. Técnicas de recolección de datos**

Los datos primarios serán obtenidos de la revisión de documentos y registros de los análisis de laboratorio realizados cronológicamente desde el inicio de funcionamiento de la planta hasta el presente estudio donde se visualiza los valores obtenidos de la eficiencia de remoción de contaminantes en cada proceso que integra la planta de tratamiento. Finalmente, los datos secundarios serán obtenidos de informes realizados sobre el funcionamiento de la planta, de las medidas de mejora y los cambios hechos en el proceso de tratamiento.

### **3.13. Instrumentos para procesar datos recopilados**

Los datos ya recopilados serán procesados mediante la utilización del programa Excel por su facilidad de acceso y amplia gama de herramientas que proporciona para este tipo de análisis.

### **3.14. Tratamiento y diseño experimental**

Se determinará el tratamiento más eficaz una vez aplicados en las muestras tomadas en diferentes horarios establecidos (9am, 12pm y 4pm). Cuando se hayan identificado las eficiencias, finalmente se verifica el cumplimiento de la normativa vigente base a los resultados.

**Análisis de las propuestas:** Las pruebas son realizadas en los cuatro tratamientos propuestos tratando de mantener constantes los parámetros como turbidez, fluoruros y similitud en el clima

al momento de tomar las muestras compuestas; para así solo variar las dosificaciones de los diferentes químicos o los filtros en cada uno de los casos. Todos estos resultados de las pruebas son contrastados con los del agua cruda y finalmente se obtiene aquel que cumple con todos los objetivos planteados al inicio de la investigación. Cabe mencionar que se muestran en la tabla 6-3 la eficiencia esperada de los tratamientos propuestos para la remoción óptima.

**Tabla 6-3.** Predicción de eficiencias de los tratamientos propuestos

<b>Tratamientos</b>		<b>Fluoruros (inicial)</b>	<b>Límite Permisible</b>	<b>Eficiencia esperada</b>
<b>Ablandamiento con cal</b>	Oxido de Calcio	± 2 mg/L	1,5 mg/L	80%
	Dolomita		1,5 mg/L	80%
<b>Alúmina Activada</b>			1,5 mg/L	85%
<b>Osmosis Inversa</b>			1,5 mg/L	95 %
<b>Intercambio Iónico</b>			1,5 mg/L	90 %

Realizado por: Morales, Lizeth, 2022

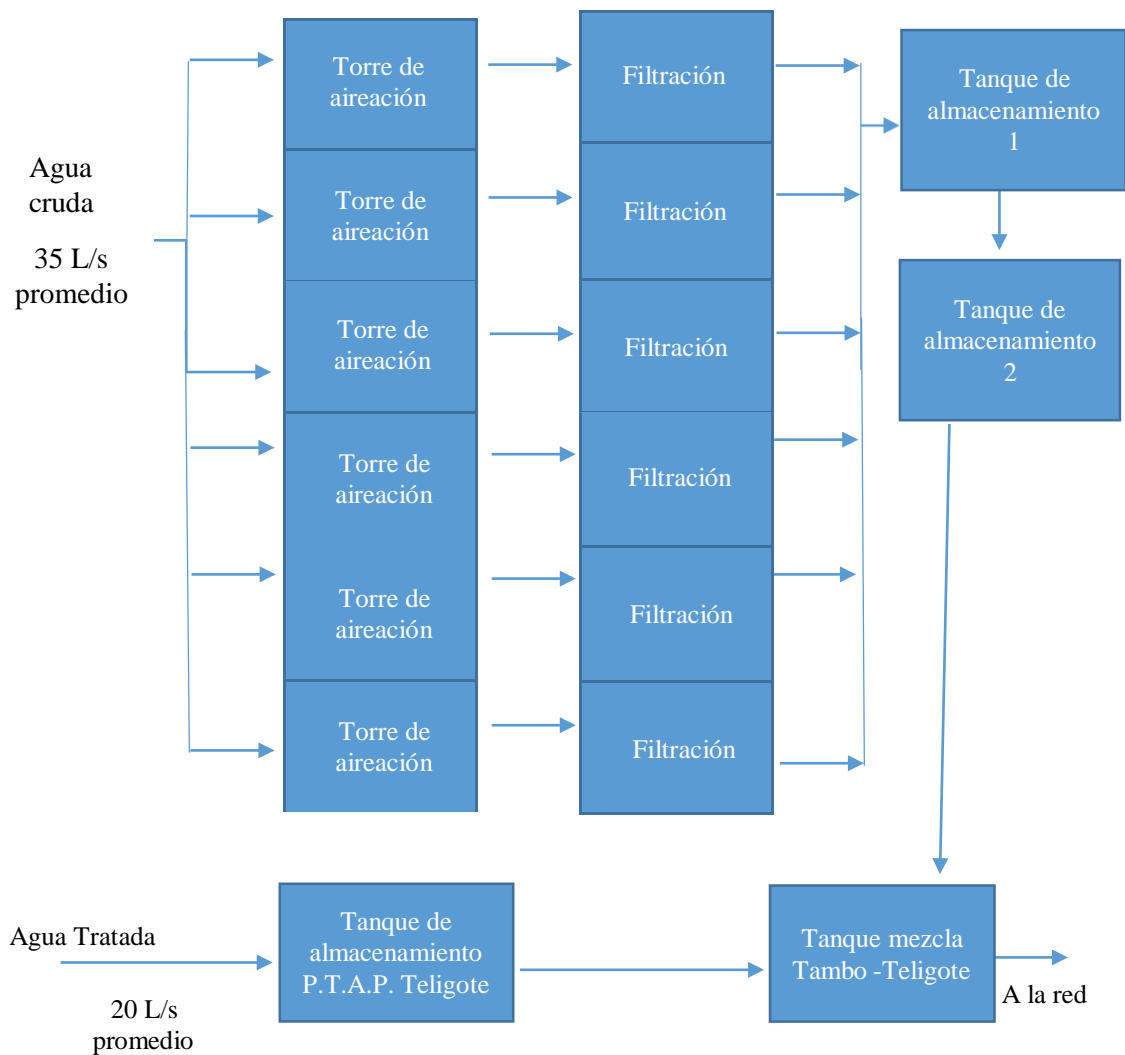
## CAPÍTULO IV

### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1. Análisis de resultados

##### 4.1.1. Evaluación de la situación actual de la planta

Actualmente en la planta El Tambo ingresa un caudal de 35 L/s hacia una torre aireación continúa a los filtros de grava y finalmente pasa al tanque de almacenamiento para la distribución, en la grafica 2-4 se detalla el esquema en mencion.



**Gráfico 1-4.** Tratamiento de agua potable actual

Realizado por: Morales, Lizeth, 2022

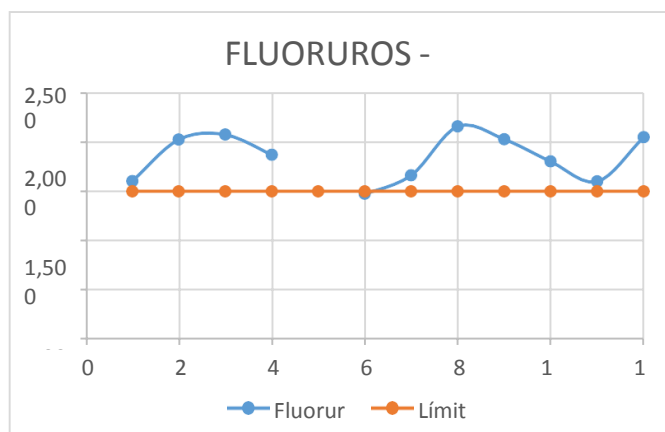
Los resultados del agua tratada según el proceso actual de tratamiento, se detallan en la tabla 7-4, los mismos que son un promedio mensual de los análisis de laboratorio realizados en el último año.

**Tabla 7-4.** Concentración de fluoruros (mg/L) en el agua en el año 2021

LUGAR	MES	Fluoruros	Límite
P.T.A.P. El Tambo - Tanque de Almacenamiento	Enero	1,61	1,5
	febrero	2,03	1,5
	Marzo	2,08	1,5
	Abril	1,87	1,5
	Mayo		1,5
	Junio	1,48	1,5
	Julio	1,66	1,5
	Agosto	2,16	1,5
	septiembre	2,03	1,5
	octubre	1,80	1,5
	noviembre	1,60	1,5
	diciembre	2,05	1,5
	<b>promedio anual</b>	<b>1,96</b>	<b>1,5</b>
	<b>límite máximo permisible</b>	<b>1,5</b>	

Realizado por: Morales, Lizeth, 2022

En la gráfica 3-4 se muestra la variación de la concentración de fluoruros en el agua tratada en contraste con el valor que indica la norma; quedando evidente el no cumplimiento en todo el transcurso del año.



**Gráfico 2-4.** Fluoruros año 2021

Realizado por: Morales, Lizeth, 2022



#### 4.1.2. Pruebas de tratabilidad

Las muestras de agua son de tipo simple tomada a horarios diferentes en el día (9am, 12pm y 4pm) las mismas que fueron homogenizadas para formar una muestra compuesta requerida para las pruebas.

##### a) Ablandamiento de agua con cal

En el test de jarras se utiliza soluciones al 1% de disolución, con dosificaciones de 1000 a 4000 mg/L para el CaO y de 200 a 500 mg/L para CaMgO. Las muestras compuestas para ambos químicos fueron obtenidas en climas lluviosos (tabla 9-4CaO y tabla 11-4 CaMgO) y soleados (tabla 8-4CaO y tabla 10-4 CaMgO). En las tablas 8-4 a la 11-4 se muestran los valores obtenidos de los parámetros fluoruros, pH, turbidez y color en los experimentos realizados.

Oxido de calcio - CaO

**Tabla 8-4.** Test 1 ablandamiento con CaO

Flúor: 1,67 pH: 8,2 Turb: 0,2 Color: 0	Jarras	CaO [ ] mg/L	Fluoruros	pH	Turbidez	Color
	1	1000	1,40	> 8,2	30,7	157
	2	2000	0,94	> 8,2	29,2	144
	3	3000	0,81	> 8,2	25,2	104
	4	4000	1,03	> 8,2	28,3	132

Realizado por: Morales, Lizeth, 2022

**Tabla 9-4.** Test 2 ablandamiento con CaO

Flúor: 1,96 pH: 8,2 Turb: 0,14 Color: 0	Jarras	CaO [ ] mg/L	Fluoruros	pH	Turbidez	Color
	1	1000	1,25	> 8,2	42,2	204
	2	2000	0,73	> 8,2	26,2	140
	3	3000	0,62	> 8,2	23,2	95
	4	4000	1,13	> 8,2	29,3	138

Realizado por: Morales, Lizeth, 2022

Dolomita CaOMgO

**Tabla 10-4.** Test 1 Ablandamiento con CaOMgO

Flúor: 2,13 pH: 8,2 Turb: 0,19 Color: 0	Jarras	CaOMgO [ ] mg/L	Fluoruros	pH	Turbidez	Color
	1	200	1,49	8,2	23,1	87
	2	300	1,36	8,2	23,7	99
	3	400	1,34	8,2	41,2	168
	4	500	1,44	8,2	41	187

Realizado por: Morales, Lizeth, 2022

**Tabla 11-4.** Test 2 ablandamiento con CaOMgO

Flúor: 2,17 pH: 8,2 Turb: 0,17 Color: 0	Jarras	CaOMgO [ ] mg/L	Fluoruros	pH	Turbidez	Color
	1	250	1,40	8,2	23,4	86
	2	300	1,33	8,2	23,7	97
	3	350	1,30	8,2	33,2	102
	4	400	1,32	8,2	38,5	159

Realizado por: Morales, Lizeth, 2022

### b) Resultados osmosis inversa

El agua circula por un filtro de poliamida ingresando a presión a través de cada capa de la membrana hasta llegar al centro donde por un tubo interno se recolecta el agua tratada; una vez obtenida se realizan análisis de laboratorio de los parámetros con más alta concentración de contaminante y se obtiene los resultados mostrados en la tabla 12-4 de una muestra tomada en clima lluvioso y en la tabla 13-4 de una muestra en clima soleado.

**Tabla 12-4.** Test 1 osmosis inversa

	Fluoruros	Cloro	pH	Turbidez	Color	Mn	Dureza	Sulfatos	Arsénico
Ingreso equipo	2,5	0,5	8,2	0,09	0	0,009	120	30	10
Salida equipo	0	0	6,2	0,11	0	0	0	0	0

Realizado por: Morales, Lizeth, 2022

**Tabla 13-4.** Test 2 osmosis inversa

	Fluoruros	Cloro	pH	Turbidez	Color	Mn	Dureza	Sulfatos	Arsénico
Ingreso equipo	2.91	0,5	8,2	0,12	0	0,006	85	27	10
Salida equipo	0	0	6,2	0,11	0	0	0	0	0

Realizado por: Morales, Lizeth, 2022

### c) Resultado alúmina activada

La alúmina activada en el mercado local se la encuentra como óxido de aluminio con un tamaño de partícula de 90  $\mu$  y es una resina mayormente utilizada en la odontología. Se la utiliza en solución al 1 % con dosificaciones de 60 a 100 ppm de una muestra compuesta tomada en clima lluvioso en las tablas 14-4 y 15-4 se presenta los resultados que se obtuvo.

**Tabla 14-4.** Test 1 alúmina activada, jarras

	Jarras	AlO <sub>3</sub> [ ] mg/L	Flúor	pH	Turbidez	Color
Flúor: 2,6 pH: 8,2 Turb.: 0,18 Color: 0	1	60	2,12	8,2	0,7	0
	2	70	2,04	8,2	0,94	0
	3	80	2,02	8,2	1,11	1
	4	90	2,04	8,2	0,95	0
	5	100	2,19	8,2	0,99	0

Realizado por: Morales, Lizeth, 2022

**Tabla 15-4.** Test 2 alúmina activada, jarras

	Jarras	AlO <sub>3</sub> [ ] mg/L	Flúor	pH	Turbidez	Color
Flúor: 2,77 pH: 8,2 Turb.: 0,21 Color: 0	1	60	1,99	8,2	0,5	0
	2	70	1,56	8,2	0,64	0
	3	80	1,62	8,2	0,71	0
	4	90	1,93	8,2	0,63	0

Realizado por: Morales, Lizeth, 2022

Además, a la alúmina activada se la utiliza como medio filtrante con una altura del lecho de 60 cm y 30 cm en diferentes tiempos de filtrado; en la tabla 16-4 están los resultados del agua filtrada

a gravedad en tiempos altos de retención y en la tabla 17-4 se indican los resultados del agua filtrada a presión a un tiempo corto de retención.

**Tabla 16-4.** Test 3 alúmina activada, filtro

Datos iniciales	Repeticiones	T <sub>retención</sub>	Altura del filtro	Flúor	pH	Turbidez	Color	% filtrado
Fluoruro: 2,96 mg/l pH: 8.2	1	24 horas	60 cm	3,09	8,2	0,81	0	30
	2	12 horas	60 cm	2,56	8,2	0,78	0	63
	3	5 horas	60 cm	1,62	8,2	0,54	0	82

Realizado por: Morales, Lizeth, 2022

**Tabla 17-4.** Test 4 alúmina activada, filtro2

Datos iniciales	Repeticiones	T <sub>retención</sub>	Altura del filtro	Flúor	pH	Turbidez	Color	% filtrado
Fluoruro: 2,2 mg/l pH: 8,2	1	3 min	30 cm	1,33	8,2	0,3	0	100
	2	3 min	30 cm	1,27	8,2	0,28	0	100
	3	3 min	30 cm	1,41	8,2	0,24	0	100

Realizado por: Morales, Lizeth, 2022

#### d) Resultados intercambio iónico

En el intercambio iónico se seleccionó como resina a la zeolita de tipo clinoptilolita del 43 al 69 % de concentración, todo es colocado en una columna de lecho fijo para ser pasada el agua a presión. Al obtener el agua tratada se realiza análisis de laboratorio de los parámetros con más alta concentración de contaminantes (ver tablas 18-4 y 19-4). Las muestras tomadas fueron en un clima soleado – nublado.

**Tabla 18-4.** Test 1 intercambio iónico

	Fluoruros	Cloro	pH	Turbidez	Color	Cloruros	Dureza	Sulfatos	Arsénico
Ingreso equipo	2,66	0	8,2	0,15	0	9,6	120	37	10
Salida equipo	0,45	0	6,8	0,15	0	0,8	0	0	0

Realizado por: Morales, Lizeth, 2022

**Tabla 19-4.** Test 2 intercambio iónico

	Fluoruros	Cloro	pH	Turbidez	Color	Cloruros	Dureza	Sulfatos	Arsénico
Ingreso equipo	2,23	0,51	8,2	0,17	0	11,2	185	28	10
Salida equipo	0,56	0	6,8	0,11	0	1	0	0	0

Realizado por: Morales, Lizeth, 2022

#### 4.1.3. Análisis de los resultados de las pruebas de tratabilidad

Una vez realizadas las pruebas de tratabilidad de los diferentes métodos propuestos se concluye que todos los métodos disminuyen la cantidad de fluoruros en el agua. Sin embargo, se esperaba una remoción no menor al 80 % en todos los casos. La eficiencia de cada método se muestra a

continuación en la tabla 20-4, donde las cantidades de fluoruros son el valor promedio de las pruebas de tratabilidad de los resultados que se encuentran dentro del límite permisible, los demás son descartados. Para el cálculo de las eficiencias se aplica la siguiente ecuación:

$$Eficiencia (\%) = \frac{C_0 - C_e}{C_0} * 100$$

**Donde:**

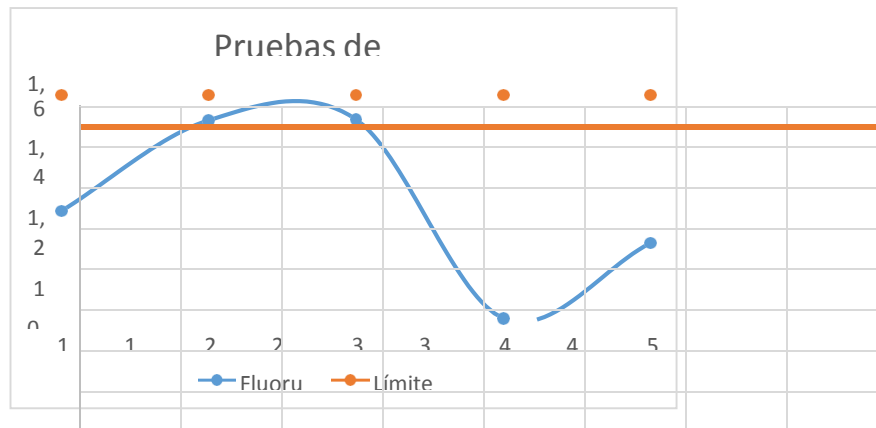
C<sub>0</sub>: concentración inicial en el agua cruda

C<sub>e</sub>: concentración en equilibrio luego del tratamiento.

**Tabla 20-4.** Eficiencia resultante de los procesos de tratamientos propuestos

Tratamientos		Fluoruros (mg/L)	Límite Permisible	Eficiencia de remoción (%)
Ablandamiento con cal	Oxido de Calcio	0,72	1,5	63,27
	Dolomita	1,33	1,5	38,14
Alúmina Activada		1,34	1,5	58,03
Osmosis Inversa		0	1,5	100
Intercambio Iónico		0,51	1,5	81,02

Realizado por: Morales, Lizeth, 2022



**Gráfico 3-4.** Concentración de fluoruros en cada proceso

Realizado por: Morales, Lizeth, 2022

Como se puede observar en la gráfica 4-4 los procesos que más remueven fluoruros son: la osmosis inversa y el intercambio iónico con 100 % y 81,02 % respectivamente; ambos eliminan no sólo este parámetro de análisis, sino que todos los contaminantes presentes en el agua.

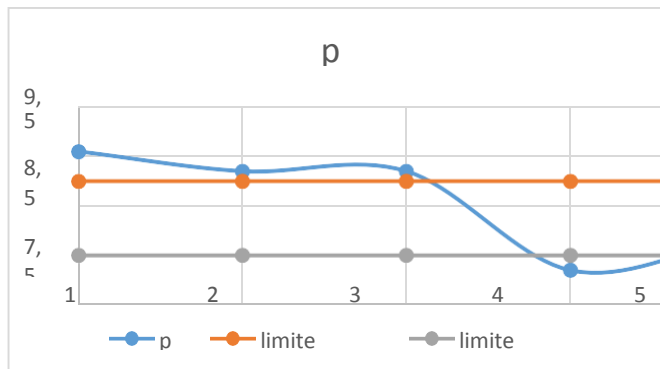
Para la elección del proceso a aplicar también se toma en cuenta los parámetros descritos a continuación en la tabla 21-4 que fueron obtenidos y cuantificados en cada una de las pruebas junto con los límites permisibles de cada uno.

**Tabla 21- 4.** Resultados de pH, turbidez y color

Tratamientos		pH	límite máximo	límite mínimo	Turbidez	límite (NTU)	Color	límite (Pt/Co)
Ablandamiento con cal	Oxido de Calcio	8,6	8	6,5	24,2	5	99,5	15
	Dolomita	8,2	8	6,5	30,45	5	116,5	15
Alúmina Activada		8,2	8	6,5	0,28	5	0	15
Osmosis Inversa		6,2	8	6,5	0,11	5	0	15
Intercambio Iónico		6,8	8	6,5	0,13	5	0	15

Realizado por: Morales, Lizeth, 2022

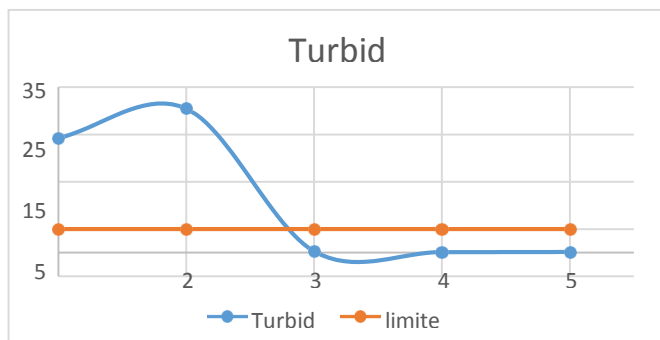
En los procesos de ablandamiento con cal (oxido de calcio y dolomita) y alúmina activada aumentan el valor de pH a 8 y en el caso de la osmosis inversa el valor de pH es 6.2 como podemos ver en la gráfica 5-4, quedando estos valores fuera del límite permisible siendo una característica a tomar en cuenta al momento de elegir un proceso.



**Gráfico 4-4.** Resultados de pH en cada proceso

Realizado por: Morales, Lizeth, 2022

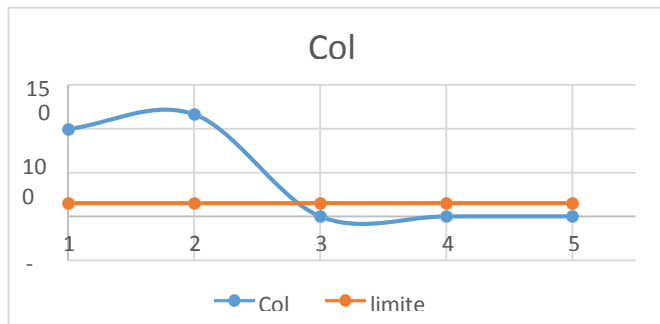
En la gráfica 6-4 se muestra como cada proceso vario la turbidez de la muestra, en el caso del ablandamiento con cal la turbidez supera los 5 NTU en comparación con los demás procesos aplicados donde se puede ver que se encuentran dentro de norma.



**Gráfico 5-4.** Resultados de Turbidez en cada proceso

Realizado por: Morales, Lizeth, 2022

El color en la caracterización inicial da como resultado cero, por lo que un proceso que aumente dicho nivel será descartado en el momento de la selección del más óptimo, como se indica en la gráfica 7-4.



**Gráfico 6-4.** Resultados de color en cada proceso  
Realizado por: Morales, Lizeth, 2022

#### 4.2. Comprobación de hipótesis

- La eficiencia de remoción mínima propuesta del 80 % se cumple en los procesos de osmosis inversa e intercambio iónico con 100% y 81,02 % respectivamente. Los demás procesos propuestos obtuvieron los siguientes porcentajes 63,27% ablandamiento con cal y 58,03% alúmina activada (ver tabla 20-4 y grafica 4-4).
- La remoción del contaminante depende del caudal por ser un parámetro indispensable en los cálculos de las cantidades a dosificar; el pH debe ser controlado en el tratamiento debido a que ciertos químicos lo aumentan considerablemente por ejemplo en el caso del ablandamiento con cal (ver tabla 8-4 y 9-4) donde el óxido de calcio por las altas cantidades dosificadas lo elevan a valores mayores de 8.2. La presión es importante en el caso de los tratamientos que utiliza filtros como en el intercambio iónico, osmosis inversa y alúmina activada, puesto que necesitan aplicarla para que el tiempo de filtrado sea el calculado (ver tablas 12-4 a la 19-4).
- En los resultados de los análisis de laboratorio se confirma que la concentración de fluoruros en el agua una vez implementado el proceso de intercambio iónico están dentro de la norma INEN 1108 - 2020 con un valor muy por debajo de 1,5 mg/L (ver anexo F).

### 4.3. Propuesta - Cálculos

En el diseño del tratamiento de remoción de fluoruros “la corriente que precede el sistema debe cumplir con ciertas condiciones como:

- Baja concentración de sólidos totales, para no disminuir la eficiencia de la resina en retener iones. De ser este el caso ubicar antes un filtro.
- Bajo nivel de hierro y manganeso. Las resinas catiónicas presentan alta selectividad con los contracciones de mayor valencia y peso molecular, por lo que deben ser removidos con anterioridad.
- Si el agua es dura, el consumo de regenerante será mayor y por tanto los costos aumentaran.

La altura del equipo será en base a la que recomienda el fabricante de la resina. Mientras más alta y estrecha es la columna diseñada mejor es la eficiencia del proceso.

**Tabla 22- 4.** Características de la corriente de ingreso

Características	Vertiente Jun Jun
Caudal (L/s)	15.93
Diámetro (in)	6

Realizado por: Morales, Lizeth, 2022sd

Para el diseño de las columnas se considera la implementación de 6 columnas de intercambio iónico a la salida de cada bandeja de aireación, por lo que el total del caudal de ingreso se lo divide.

#### 4.3.1. Cálculos para el sistema de intercambio iónico

- Concentración de cationes

$$P.E_{[F^-]} = \frac{PM}{\# \text{ carga}} = \frac{19mg}{1}$$

**Donde:**

**PE:** peso equivalente

**PM:** peso molecular

$$\frac{m Eq}{L} = \frac{[1.85]mg/L}{19 \frac{mg}{meq}} = 0.097 meq/L$$

- Volumen del lecho de resina

$$SFR = \frac{Q_1}{V_R} \left[ \frac{m^3 \text{ de agua}}{m^3 \text{ de agua} * \text{ hora}} \right]$$

**Donde:**

**SFR:** service flow rate (ficha técnica)

**Q<sub>i</sub>**: caudal del servicio  
**V<sub>R</sub>**: volumen de la resina

$$V_R = \frac{Q_1}{SFR}$$

$$V_R = \frac{2.66 \frac{L}{s} \left( \frac{1 m^3}{1000 L} * \frac{3600 s}{1 h} \right)}{48.89 \frac{m^3 agua}{m^3 resina * h}}$$

$$V_R = 0.2 m^3$$

Se escoge un factor de seguridad del 10 % dándonos un resultado de:

$$V_R = 0.2 + 0.1 * 0.2 = 0.22 m^3$$

La presentación del producto es de 1 pie<sup>3</sup> según este fabricante por lo que se realizaría una compra de los siguientes sacos.

$$sacos\ totales = \frac{0.22 m^3 (1000 L / 1m^3)}{28.32\ litros /saco} = 7.77 \approx 8\ sacos$$

- Duración del ciclo

$$t = \frac{V_{H_2O}}{Q_i}$$

**Donde,**

**V<sub>H</sub>** : Capacidad del tanque de almacenamiento

**Q<sub>i</sub>**: caudal de la corriente de ingreso

**t**: tiempo que tarda en llenarse el tanque

$$t = \frac{35 m^3}{2.66 \frac{L}{s} \left( \frac{1 m^3}{1000 L} * \frac{3600 s}{1 h} \right)}$$

$$t = 3.65 \approx 4\ horas$$

Si la capacidad operativa es menor que la capacidad total, entonces la resina cumple el requerimiento.

- Producción neta

El caudal de operación es de 2.66 L/s (f), este flujo es debido a la demanda. Entonces aplicamos a la ecuación:

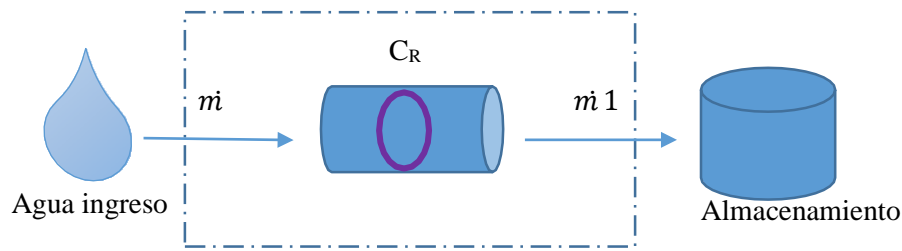
$$Q = f * t_{CA}$$

$$Q = 2.66 \frac{L}{s} \left( \frac{3600 s}{1 h} \right) * 4 h$$

$$Q = 10.64 L$$



- Capacidad operativa de intercambio iónico



**Figura 5-4.** Balance en la etapa de intercambio iónico

Realizado por: Morales, Lizeth, 2022

Donde,

$m_i$ , representa la cantidad de aniones en la corriente por unidad de tiempo

$m_1$ , es la cantidad de aniones que salen del intercambiador.

Al aplicar la ley de la conservación de materia:

$$\begin{matrix} \text{Acumulacion} & \text{entrada por } b & \text{salida por } b & \text{generacion} & \\ \text{[ dentro del ]} & \text{[ limites del ]} & \text{[ limites del ]} & \text{[ dentro del ]} & \text{consumo dentro} \\ \text{sistema} & \text{sistema} & \text{sistema} & \text{sistema} & \text{del sistema} \end{matrix}$$

El estado es estacionario, entonces:

$$\text{entrada} = \text{salida}$$

$$m_1 + m_2 = m_3$$

$$C_1 * Q_1 = C_0 * Q_0$$

La densidad no varía a lo largo del proceso, por tanto:

$$Q_{\text{ingresa}} = Q_{\text{salida}}$$

En función de la concentración:

$$V_R \frac{dC_R}{dt} = C_1 Q_1 - C_0 Q_0$$

$$dC_R = \frac{(C_1 - C_0)}{V_R} dt$$

$$\int_0^{C_R} dC_R = \frac{(C_1 - C_0)}{V_R} \int_0^t dt$$

Para las condiciones de frontera en un tiempo cero la resina no ha tenido ningún intercambio iónico por lo tanto la concentración de fluoruros es cero. Mientras que en un tiempo t, ha intercambiado los iones; por lo tanto:

$$C_R = \frac{(C_1 - C_0)Q_1}{V_R} t$$

Reemplazando valores:

$$C_R = \frac{\left( \frac{0.097 \text{ meq}}{\text{L}} - 0.027 \frac{\text{meq}}{\text{L}} \right) * \frac{2.66 \text{ l}}{\text{s}} * \left( \frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ h}} \right) 4 \text{ h}}{0.2 \text{ m}^3 * \frac{1000 \text{ L}}{1 \text{ m}^3}}$$

$$C_R = 13.4 \frac{\text{meq}}{\text{L}}$$

Los cálculos muestran que la capacidad útil de la resina es suficiente para garantizar una adsorción completa, porque la capacidad útil es menor que la capacidad total.

- Altura de la resina y de la columna

#### Datos,

- Diámetro nominal (D): 16 pulgadas
- Diámetro (D<sub>i</sub>): 0.4064 m

Área transversal de flujo por la columna (cm<sup>2</sup>):

$$A = \frac{\pi}{4} * D^2$$

$$A = \frac{\pi}{4} * (0.4064)^2 \text{ m}^2$$

$$A = 0.13 \text{ m}^2$$

$$H = \frac{V_R}{A}$$

$$H = \frac{0.2 \text{ m}^3}{0.13 \text{ m}^2} = 1.54 \text{ m}$$

Zona libre recomendada por el fabricante del 50%:

$$H_{\text{libre}} = H * 0.5 = 1.54 \text{ m} * 0.5 = 0.77 \text{ m}$$

Expansión recomendada por el fabricante del 40 %:

$$H_E = H * 0.4 = 1.54 \text{ m} * 0.4 = 0.62 \text{ m}$$

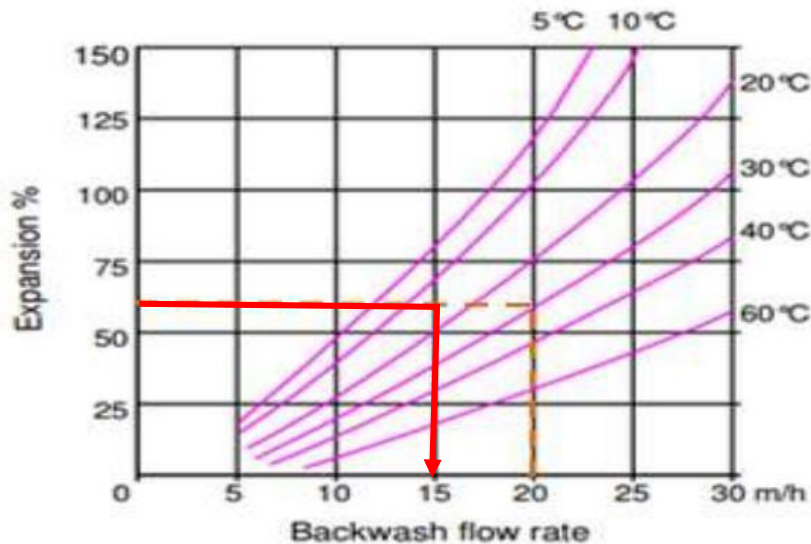
Altura total de la columna de resina aniónico:

$$H_T = H + H_{\text{libre}} + H_E$$

$$H_T = 1.54 + 0.77 + 0.62 = 2.93 \text{ m}$$

### 4.3.2. Cálculos del sistema de regeneración

*Retrolavado:* circulación del agua en sentido contrario al proceso normal para descompactar el lecho y retirar sedimentos existentes. El fin de este proceso es expandir la resina a un 50 o 75 % por un tiempo aproximado de 10 a 15 minutos, según especificaciones del fabricante se tomó el 50 % de expansión con un tiempo de 10 minutos con esto se provee ahorrar agua en el proceso.



**Figura 6-4.** Tasa de flujo de retrolavado vs expansión del lecho

Fuente: (Agamez Salvador, 2014)

Realizado por: Morales, Lizeth, 2022

$$Q_d = v_d * A_c$$

**Donde,**

**Q<sub>d</sub>:** caudal de descompactación

**v<sub>d</sub>:** velocidad de descompactación

**A<sub>c</sub>:** área de la columna

$$Q_d = (15 \text{ m/h}) * 0.13 \text{ m}^2$$

$$Q_d = 1.95 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$V_d = Q_d * t_d$$

**Donde,**

**V<sub>d</sub>:** volumen de agua para la descompactación

**t<sub>d</sub>:** tiempo de descompactación

$$V_d = \left( \frac{1.95 \text{ m}^3}{\text{h}} \right) * \left( 10 \text{ min} * \frac{1 \text{ h}}{60 \text{ min}} \right)$$

$$V_d = 0.33 \text{ m}^3$$

*Regeneración:* se lo determina por los siguientes cálculos

- Caudal

$$RFR = \frac{Q_{Reg}}{V_R}$$

**Donde,**

**RFR:** tasa de flujo del regenerante (3 m<sup>3</sup> regenerante / m<sup>3</sup> resina\*h)

**V<sub>R</sub>:** volumen del lecho

**Q<sub>Reg</sub>:** caudal de regeneración

$$Q_{reg} = 3 \frac{m^3 \text{ regenerante}}{m^3 \text{ resina} * h} * 0.2 m^3$$

$$Q_{reg} = 0.6 \frac{m^3}{h}$$

- Velocidad de regeneración

$$v_{reg} = \frac{Q_{reg}}{A_C}$$

$$v_{reg} = \frac{0.6 \frac{m^3}{h}}{0.13 m^2}$$

$$v_{reg} = 4.62 \frac{m}{s}$$

- Volumen de la solución regenerante

$$nivel = \frac{\text{masa de NaCl}}{\text{volumen de la resina}}$$

Despejando la masa de NaCl tenemos:

$$\text{masa NaCl} = nivel * \text{volumen de resina}$$

$$\text{masa NaCl} = \frac{220 \text{ kg NaCl}}{m^3 \text{ resina}} * 0.2 m^3 = 44 \text{ kg NaCl}$$

$$\% \frac{p}{p} = \left( \frac{\text{kg soluto}}{\text{kg soluto} + \text{kg solvente}} \right) * 100$$

En base a la especificación del fabricante del 10% p/p para regenerar la resina:

$$10\% = \left( \frac{44 \text{ kg}}{44 \text{ kg} + \text{kg H}_2\text{O}} \right) * 100$$

$$\text{Masa H}_2\text{O} = \left( 44 * \frac{100}{10} \right) - 44 = 396 \text{ kg}$$

La densidad del agua a 20°C es de 998 kg/m<sup>3</sup>, por tanto:

$$\rho_{H_2O} = \frac{\text{masa}}{\text{volumen}}$$

$$\text{Volumen}_{H_2O} = \frac{\text{masa}}{\rho_{H_2O}}$$

$$\text{Volumen}_{H_2O} = \frac{396 \text{ kg}}{998 \text{ kg/m}^3} = 0.39 \text{ m}^3$$

Para calcular el volumen del tanque regenerante en la siguiente tabla se muestra la densidad de soluciones de NaCl:

**Tabla 23-4.** Densidad de soluciones NaCl

Porcentaje %	0.0 °C	10 °C	25°C	40°C
1	1.00747	1.00707	1.00409	0.99908
2	1.01509	1.01442	1.01112	1.00593
4	1.03038	1.02920	1.02530	1.01977
8	1.06121	1.05907	1.05412	1.04798
12	1.09244	1.08946	1.08365	1.07699
16	1.12419	1.12056	1.1401	1.10688
20	1.15663	1.15254	1.14533	1.13774
24	1.18999	1.18557	1.17776	1.16971
26	1.20709	1.20254	1.19443	1.18614

Fuente: Perry, J. H. Manual del Ingeniero Químico. 3ª edición, UTHEA. MEXICO, 1996

Realizado por: Morales, Lizeth, 2022

Interpolando  $d$  de la solución en  $g/cm^3$

$$\frac{(x - 1.05412)}{(1.08365 - 1.05412)} = \frac{(10 - 8)}{(12 - 8)}$$

$$x = 1.06888 \frac{g}{cm^3} * \frac{1 kg}{1000g} * \frac{(100cm)^3}{1m^3} = 1068.88 \frac{kg}{m^3}$$

Entonces:

$$masa sol. = 44kg (masa de NaCl) + 396kg (masa de agua) = 440 kg$$

$$volumen sol. = \frac{440 kg}{1068.88 \frac{kg}{m^3}} = 0.412m^3$$

Se debe considerar un 10 % más para el volumen del tanque:  $0.612 m^3$ .

- Tiempo de regeneración

$$t = \frac{V_{Reg}}{Q_{Reg}}$$

$$t = \frac{0.412m^3}{0.6 \frac{m^3}{h}}$$

$$t = 0.687 h$$

*Lavado:* se deja fluir el agua tratada en la forma normal de operación para luego ser desechada” (Agamez Salvador, 2014).

#### **4.4. Discusión de resultados**

En las pruebas realizadas para comparar la eficiencia de cada uno de los procedimientos propuestos se obtuvieron resultados que no superaron las expectativas ya que cada uno de ellos si bien por un lado cumplen con el objetivo general de disminuir la carga contaminante de fluoruros dejándola dentro del límite permisible, por otro lado los porcentajes de remoción no son los óptimos ni esperados; además algunos de ellos provocan el aumento de la concentración de otros contaminantes en el agua por los residuos que estos químicos dejan al ser utilizados en el tratamiento.

En el proceso propuesto por ablandamiento con Cal se utilizaron dos variedades de la misma que son las más fáciles de adquirir en el mercado local, entre ellas están el óxido de Calcio y la Dolomita con porcentajes de remoción que superan el 75%. Al comparar entre estos químicos el óxido de calcio remueve más cantidad de fluoruros del agua, pero con dosificaciones entre los 1000mg/L y los 4000 mg/L de la solución preparada al 1% por lo que el consumo de químico para aplicar este tratamiento sería en grandes cantidades. En cuanto se prueba la dolomita esta remueve el contaminante hasta dejarlo por debajo del límite permisible con cantidades dosificadas entre 200 mg/L y 500 mg/L muy por debajo de las utilizadas con el CaO, pero el porcentaje de eficiencia no está dentro de lo esperado. Ambos tratamientos generan un aumento en parámetros físicos como turbidez, pH y color en el agua quedando por fuera de los límites permisibles en base a la norma vigente, sin embargo, el problema más grave que causa este tipo de tratamiento es el aumento de la dureza, generando un contaminante más a eliminar con la ayuda de procesos adicionales. Cabe recalcar que la dureza en el agua sujeta a investigación contiene valores de 120 ppm en un promedio anual quedando dentro de lo que permite la norma.

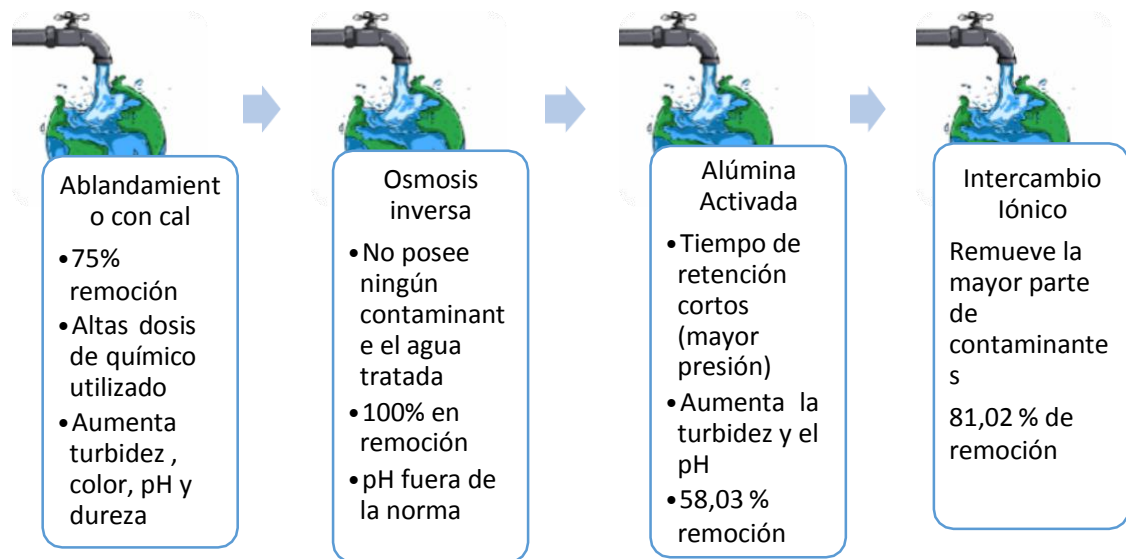
En el siguiente proceso aplicado de osmosis inversa se pasó el agua por la membrana filtrante de poliamida enrollada. El agua resultante no contiene ningún tipo de contaminante como fluoruros, cloro, dureza, manganeso sulfatos y arsénico, resultando una eficiencia del 100 % en remoción, pero el valor de pH final se encuentra fuera de norma por lo que se necesitaría la aplicación de un regulador de pH para modificarlo. Se escogieron solo estos parámetros porque son los parámetros que generan mayores problemas en la muestra de agua cruda tomada de la vertiente.

La alúmina activada es otro proceso analizado con prometedoras eficiencias de remoción similares a las obtenidas con la osmosis inversa o intercambio iónico. En esta prueba se utilizó el químico óxido de aluminio primero se preparó una solución al 10% misma que al dosificar no remueve el contaminante y eleva la turbidez de la muestra. La segunda opción de utilización con este químico es como un lecho filtrante el cual fue eficiente al remover el contaminante fluoruro dejándolo por dentro de norma. Este proceso altera el pH y de manera leve la turbidez que podría

ser considerado este último como despreciable; todos estos parámetros mencionados se encuentran dentro de la norma vigente.

Finalmente, el intercambio iónico, es un proceso que deja la mayor cantidad de contaminantes en cero como la dureza, los sulfatos, el cloro y el arsénico; pero específicamente en el caso de los fluoruros solo remueve un 81.02% de eficiencia.

A continuación, se resumen y comparan todos los resultados obtenidos:



**Figura 7-4.** Comparación de resultados  
**Realizado por:** Morales, Lizeth, 2022

En la tabla 20 se muestran los porcentajes de eficiencias obtenidos; dentro de los cuales las más altas son el intercambio iónico, la osmosis inversa y para determinar cuál método aplicar se analiza el aspecto económico que en base a cotizaciones obtenidas por parte de Acquetech (empresa dedicada al tratamiento de aguas) se conoce que el presupuesto para la puesta en marcha es el siguiente para cada uno de los procesos con mejor remoción del contaminante:

**Tabla 24-4.** Presupuestos de los tratamientos con mayor remoción

TRATAMIENTOS	PORCENTAJE DE REMOCION	Caudal (L/s)	Presupuesto de inversión
Osmosis Inversa	100 %	35	\$ 1.160.000
Intercambio Iónico	81.02 %	35	\$ 28030.5

**Realizado por:** Morales, Lizeth, 2022

El intercambio iónico químicamente cumple con los objetivos planteados por no generar residuos sedimentables, no utilizar químicos y podría reemplazar todo el proceso de tratamiento actual que

tiene la planta, pero para ponerla en marcha se debe analizar los costos de operacionalidad que este proceso generaría, tanto para su construcción como para garantizar una larga vida útil.

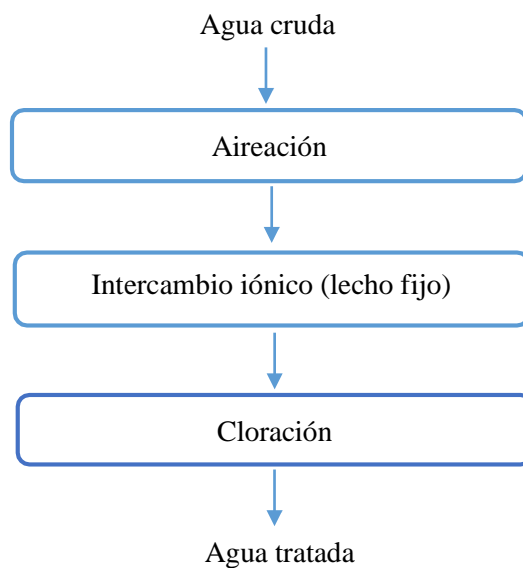
En la tabla a continuación se muestra los costos a detalle para implementar cada columna de intercambio iónico en el tratamiento actual, los mismos que serían:

**Tabla 25-4.** Detalle de costos para la columna de intercambio iónico

Equipo / Material	Características	Costo \$
Tuberías, codos	Polietileno de alta densidad	150
Columna de lecho fijo	Acero inoxidable 304	2600
Resina	Clinoptilolita (1 pie <sup>3</sup> /saco)	80
Bomba	Bomba centrífuga THEBE	1741.75
Mano de Obra	Construcción	100
Total		4671.75

**Realizado por:** Morales, Lizeth, 2022

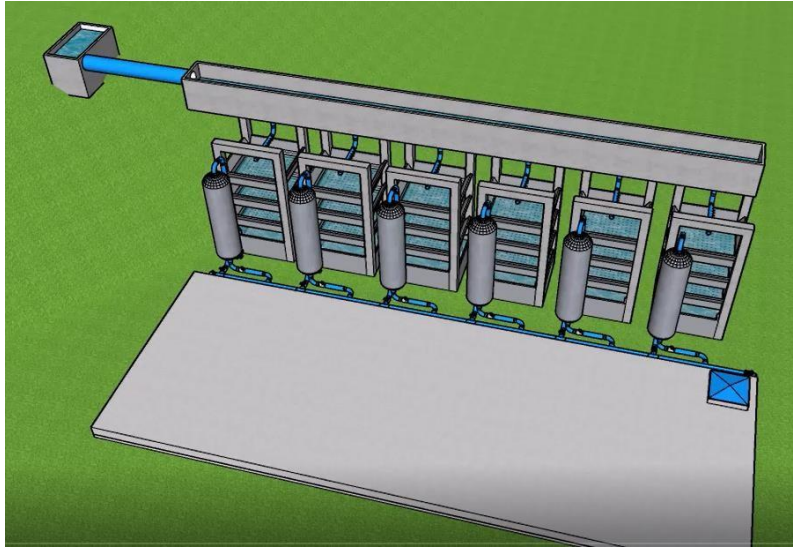
Una vez analizados todos los aspectos como remoción de fluoruros, pH, turbidez y caudal, además del presupuesto necesario para su puesta en marcha se determina que el nuevo proceso de tratamiento para la Planta El Tambo sería el siguiente que se muestra en el diagrama de flujo (ilustración 6-4). Las bandejas de aireación existentes en el tratamiento actual no se eliminan del rediseño por la función que cumple de remover manganeso y hierro, especificación necesaria que debe cumplir el agua antes de ingresar a las columnas de lecho fijo para aumentando así el tiempo de vida útil del equipo. (ver anexo G)



**Figura 8-4.** Diagrama del tratamiento propuesto, planta El Tambo

**Realizado por:** Morales, Lizeth, 2022





**Figura 9-4.** Diseño planta final  
Realizado por: Morales, Lizeth, 2022

## 5. CONCLUSIONES

- Se cuantificó la concentración de los contaminantes físicos, químicos y microbiológicos del agua cruda en los análisis de laboratorio donde los parámetros que se encuentran fuera del límite permisible son: fluoruros (2mg/L), arsénico (10pm), nitratos (3.1mg/L), sulfatos (29mg/L), fosfatos (26mg/L), Coliformes totales (156 UFC/100 mL).
- Los parámetros de diseño del proceso propuesto son: el caudal de ingreso al tratamiento (10.64 L/s), tiempo de duración del ciclo (4 h), altura de la resina (1.54 m), diámetro del lecho fijo (6 in) y la altura de la columna del lecho fijo (2.93 m), el tiempo de duración del ciclo 4 horas.
- El intercambio iónico y la osmosis inversa reducen la cantidad de fluoruros hasta por debajo límite permisible, con porcentajes de remoción altos de 100% y 81.02% respectivamente. Por lo tanto el diseño del nuevo sistema de tratamiento tiene los siguientes procesos: el agua cruda ingresa por un canal de distribución hacia una tubería con perforaciones, para homogéneamente ser distribuida en las bandejas de aireación, luego continúa la columna de intercambio iónico y finalmente al tanque de cloración.
- Al aplicar el tratamiento propuesto se disminuye la concentración del contaminante problema fluoruros resultando un valor de 0.45 mg/L, además se consigue disminuir más contaminantes como nitratos 0.8mg/L, fosfatos 9.55mg/L, sulfatos 0 mg/L y arsénico 0 mg/L. Todos estos parámetros mencionados están dentro del límite máximo permisible indicado en la norma INEN 1108-2020.
- La caracterización final muestra los siguientes resultados de porcentajes de remoción: fluoruros 78%, arsénico 100%, fosfatos 63.3%, sulfatos 100%, nitratos 74.2% y Coliformes totales 100%.

## 6. RECOMENDACIONES

- Cambiar el filtro de zeolita cada 6 meses con el fin de que las condiciones de operación sigan siendo óptimas.
- No utilizar dolomita, óxido de calcio o hidróxido de calcio para el tratamiento de agua cuando la concentración de dureza en la muestra sea alta.
- Realizar futuras investigación con diferentes concentraciones de dolomita CaOMgO en la composición final, la utilizada en este análisis fue al 20% de MgO comercialmente la más consumida y de fácil adquisición a nivel local.
- Experimentar con la alúmina activada haciendo variaciones en la altura del lecho filtrante en tiempos cortos de filtrado y con una circulación del agua a presión.

## GLOSARIO

**Vertiente:** “se le suele llamar vertiente al escape de agua a la superficie de las napas subterráneas” (EDUCALINGO, 2018).

**Adsorción:** “es un proceso donde átomos o moléculas quedan adheridos en las paredes de un material poroso. (Chan, 2021) Involucra transferencia de masa de un gas o líquido a la superficie de un sólido” (Silva & Fernández, 2021).

**Adsorbente:** “material sólido con capacidad de adsorción. Los adsorbentes de acuerdo a su naturaleza son selectivos a los solutos” (Silva & Fernández, 2021).

**Adsorbato:** moléculas gaseosas o líquidas que van a ser adsorbidas.

**Fisorción:** “acción de las fuerzas intermoleculares y las atracciones electrostáticas entre el material y la solución acuosa, por lo tanto, las moléculas no se adsorben en sitios específicos lo que permite que interactúen libremente sobre la superficie del adsorbente”. (Tirado Poveda, 2021)

**Quimisorción:** se caracteriza por la especificidad para formar complejos superficiales ente el adsorbente y las moléculas del adsorbato este proceso suele ser generalmente irreversible.

**Membrana semipermeable:** “dejan pasar selectivamente el solvente e impiden el paso a los solutos, desempeñan un papel clave en el proceso. Las membranas son poco permeables a los iones y a las moléculas con cargas electroestáticas; a mayor carga, mayor será la retención.” (Condorchem, 2020).

**Standard methods for the examination of water and wastewater:** métodos utilizados para análisis de laboratorio desarrollados por organismos de normalización reconocidos nacional e internacionalmente.

**Total de solidos disueltos:** “es una medida de la cantidad de material disuelto en el agua. Este material puede incluir los siguientes: carbonato, bicarbonato, cloruro, sulfato, fosfato, nitrato, calcio, magnesio, sodio, iones orgánicos, y otros iones.” (News, 2021).

**Espectrofotómetro:** “El espectrofotómetro consigue hacer visible todo el rango a medir, desde el infrarrojo hasta el ultravioleta. El espectrofotómetro puede analizar mejor los valores de reflectancia y calcular posibles variaciones de color entre dos puntos.” (PCE, 2020).

## BIBLIOGRAFIA

- Agamez Salvador, C. I. (2014). Diseño De Un Sistema De Intercambio Catiónico De Lecho Fijo Para La Potabilización De Agua En El Corregimiento De Malagana (Bolívar). *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699.
- Armas-Vega del Carmen, A., González-Martínez, F. D., Rivera-Martínez, M. S., Mayorga-Solórzano, M. F., Banderas-Benítez, V. E., & Guevara-Cabrera, O. F. (2019). Factors associated with dental fluorosis in three zones of Ecuador. *Journal of Clinical and Experimental Dentistry*, 11(1), e42–e48. <https://doi.org/10.4317/jced.55124>
- Brazier, Y. (2021, January 25). ¿Por qué el agua contiene fluoruro? *Medical News Today*. <https://www.medicalnewstoday.com/articles/es/fluoruro#riesgos>
- Burbano, N., Becerra, S., & Efrén, P. (2021). *Introducción a la Hidrogeología del Ecuador*. <https://es.scribd.com/document/513375293/Introduccion-a-la-Hidrologia-del-Ecuador>
- Condorchem. (2020). *La osmosis inversa y sus aplicaciones*. Condorchem Envitech. <https://blog.condorchem.com/la-osmosis-inversa-y-sus-diferentes-aplicaciones/>
- Cornelissen, E. R., Harmsen, D. J. H., Blankert, B., Wessels, L. P., & van der Meer, W. G. J. (2021). Effect of minimal pre-treatment on reverse osmosis using surface water as a source. *Desalination*, 509(April), 115056. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2021.115056>
- Corral-Capulin, N. G., Vilchis-Nestor, A. R., Gutiérrez-Segura, E., & Solache-Ríos, M. (2018). The influence of chemical and thermal treatments on the fluoride removal from water by three mineral structures and their characterization. *Journal of Fluorine Chemistry*, 213, 42–50. <https://doi.org/10.1016/j.jfluchem.2018.07.002>
- Damtie, M. M., Woo, Y. C., Kim, B., Hailemariam, R. H., Park, K. D., Shon, H. K., Park, C., & Choi, J. S. (2019). Removal of fluoride in membrane-based water and wastewater treatment technologies: Performance review. *Journal of Environmental Management*, 251. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109524>
- Dardel. (2020). *Agua Potable Procesos de Intercambio Iónico*. Dardel. [http://dardel.info/IX/processes/drinking\\_water\\_ES.html](http://dardel.info/IX/processes/drinking_water_ES.html)
- Das, D., & Nandi, B. K. (2020). Simultaneous removal of fluoride and Fe (II) ions from drinking water by electrocoagulation. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(1). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103643>
- Dell, L., María, U., Cavallero, I., Gondar, R., & Chianetta, P. (n.d.). *Esta publicación forma parte del Proyecto de Experimentación y Provisión de Agua para Comunidades Aborígenes de la Provincia de Formosa. Editores: Asociación para la Promoción de la Cultura y el Desarrollo (A Coordinadores de la Publicación: Agradecimientos)*.
- Descalcificador. (2017). *¿Qué es la osmosis inversa? Tratamiento del agua potable*. <https://descalcificador10.com/que-es-osmosis-inversa/>
- Dhadge, V. L., Medhi, C. R., Changmai, M., & Purkait, M. K. (2018). House hold unit for the treatment of fluoride, iron, arsenic and microorganism contaminated drinking water. *Chemosphere*, 199, 728–736. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.02.087>

- Espigares, M., & Pérez, J. (2010). Precipitación Química Ablandamiento Del Agua. *Artículo, 1*, Pág 2.  
<http://cidta.usal.es/cursos/ETAP/modulos/libros/ablandamiento.pdf>
- Eunice Jayashree, D., Pooja, G., Senthil Kumar, P., & Prasannamedha, G. (2020). A review on fluoride: Treatment strategies and scope for further research. *Desalination and Water Treatment, 200*, 167–186.  
<https://doi.org/10.5004/dwt.2020.26010>
- Fluoruros. (2020). Carbotecnia.  
<https://www.carbotecnia.info/aprendizaje/quimica-del-agua/que-son-los-fluoruros-y-como-afectan-en-el-agua/>
- Fordyce, F. M. (2019). Fluorine: Human health risks. In *Encyclopedia of Environmental Health* (pp. 41–50). Elsevier.  
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.11194-7>
- Grijalva Endara, A. de las M., Jiménez Heinert, M. E., & Ponce Solórzano, H. X. (2020). Desmineralización del agua como respuesta ante el cambio climático. *Recimundo, 4*(4), 22–36.  
[https://doi.org/10.26820/recimundo/4.\(4\).octubre.2020.22-36](https://doi.org/10.26820/recimundo/4.(4).octubre.2020.22-36)
- Grzegorzek, M., Majewska-Nowak, K., & Ahmed, A. E. (2020). Removal of fluoride from multicomponent water solutions with the use of monovalent selective ion-exchange membranes. *Science of the Total Environment, 722*.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137681>
- HACH. (2020). ¿Qué es la dureza? Hach. <https://www.calcinor.com/es/actualidad/2017-03-16/cal-tratamiento-de-aguas/>
- He, J., Yang, Y., Wu, Z., Xie, C., Zhang, K., Kong, L., & Liu, J. (2020). Review of fluoride removal from water environment by adsorption. *Journal of Environmental Chemical Engineering, 8*(6).  
<https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104516>
- Kumari, U., Siddiqi, H., Bal, M., & Meikap, B. C. (2020). Calcium and zirconium modified acid activated alumina for adsorptive removal of fluoride: Performance evaluation, kinetics, isotherm, characterization and industrial wastewater treatment. *Advanced Powder Technology, 31*(5), 2045–2060.  
<https://doi.org/10.1016/j.apt.2020.02.035>
- Li, J., Zhang, H., Zhang, J., Xiao, Q., Du, X., & Qi, T. (2019). Efficient Removal of Fluoride by Complexation Extraction: Mechanism and Thermodynamics. *Environmental Science and Technology, 53*(15), 9102–9108.  
<https://doi.org/10.1021/acs.est.9b02369>
- Limousy, L., & Thiebault, T. (2022). *New Materials and Technologies for Wastewater Treatment, 1*, 1–5.
- Mahmoud, N., Mutchnick, S. A., Svider, P. F., McLeod, T. M., & Fribley, A. M. (2020). Fluorine in human metabolism, health and disease. In *Essential and Toxic Trace Elements and Vitamins in Human Health*. Elsevier Inc.  
<https://doi.org/10.1016/b978-0-12-805378-2.00011-5>
- Mesfer, M. K. Al. (2022). *Optimization of fluoride adsorption from aqueous solution over*

- mesoporous titania-alumina composites using Taguchi method. June 2021, 1–21.*  
<https://doi.org/10.1002/wer.1663>
- Muddemann, T., Haupt, D., Sievers, M., & Kunz, U. (2019). Electrochemical Reactors for Wastewater Treatment. In *Chemie-Ingenieur-Technik* (Vol. 91, Issue 6, pp. 769–785). Wiley-VCH Verlag. <https://doi.org/10.1002/cite.201800193>
- Muhamad, N., Makhtar, S. N. N. M., Abdullah, N., Pauzi, M. Z. M., Mahpoz, N. M. ammar, Othman, M. H. D., Jaafar, J., Abas, K. H., Fadil, N. A., & Rahman, M. A. (2021). Composite zeolite hollow fiber membrane for the removal of nickel using forward osmosis. *Journal of Water Process Engineering, 40*.  
<https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101806>
- National of institutes of Health. (2020). *Fluoruro*.  
<https://ods.od.nih.gov/factsheets/Fluoride-DatosEnEspañol/>
- News. (2021). *¿Que es el intercambio iónico?* Fluence.  
<https://www.fluencecorp.com/es/que-es-el-intercambio-ionico/>
- NTE INEN 1108. (2011). Agua potable. Requisitos. *Instituto Ecuatoriano de Normalización, 9*.
- OMS. (2020). *Salud Bucodental*.  
<https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/oral-health>
- Patnaik, P. C., Swain, S. K., Patel, S. B., Patnaik, T., Muller, F., Delpoux-Ouldriane, S., Das, S., & Dey, R. K. (2018). Kinetics and thermodynamics of defluoridation of drinking water using high performance hybrid zirconium (IV)-hexamethylenediamine: A comparative aspect with ion-exchanger amorphous zirconium (IV) phosphate. *Surfaces and Interfaces, 13*, 22–32.  
<https://doi.org/10.1016/j.surfin.2018.07.001>
- PCE. (2020). *Espectrofotómetro*.  
[https://www.pce-instruments.com/espanol/instrumento-medida/medidor/espectrofotometro-kat\\_160028.htm#:~:text=El espectrofotómetro es un dispositivo, en todo el rango iluminado.](https://www.pce-instruments.com/espanol/instrumento-medida/medidor/espectrofotometro-kat_160028.htm#:~:text=El%20espectrofot%C3%B3metro%20es%20un%20dispositivo,en%20todo%20el%20rango%20iluminado.)
- Pillai, P., Dharaskar, S., Shah, M., & Sultania, R. (2020). Determination of fluoride removal using silica nano adsorbent modified by rice husk from water. *Groundwater for Sustainable Development, 11*.  
<https://doi.org/10.1016/j.gsd.2020.100423>
- Ruiz, R. (2017). *Remoción de flúor en agua mediante adsorción en suelos residuales*. Universidad Nacional de Córdoba.
- Sarmiento, Nicol. (2017). *Las funciones que realiza la cal en el tratamiento de aguas*. Calcicor.  
<https://www.calcinor.com/es/actualidad/2017-03-16/cal-tratamiento-de-aguas/>
- Serrano, Nelson. (2018). *Tratamiento de Agua Potable Alúmica Activada*. Chemxin.  
<http://m.chemxin-es.com/news/drinking-water-treatment-activated-alumina-15948679.html>
- Shanker, A. S., Srinivasulu, D., & Pindi, P. K. (2020). A study on bioremediation of fluoride-contaminated water via a novel bacterium *Acinetobacter* sp. (GU566361) isolated from potable water. *Results in Chemistry, 2*.  
<https://doi.org/10.1016/j.rechem.2020.100070>

- Silva, J., & Fernández, G. (2021). *ADSORCION: UNA ALTERNATIVA PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES CON SOLIDOS SUSPENDIDOS*. Centro Nacional de Prevención de Desastres.
- Tao, W., Zhong, H., Pan, X., Wang, P., Wang, H., & Huang, L. (2020). Removal of fluoride from wastewater solution using Ce- $\text{AlOOH}$  with oxalic acid as modification. *Journal of Hazardous Materials*, 384.  
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121373>
- Tirado Poveda, H. M. (2019). *EVALUACIÓN DE LA CINÉTICA DE ADSORCIÓN DE FLUORURO DE AGUA NATURAL MEDIANTE UN LECHO FLUIDIZADO DE HIDROXIAPATITA DE CALCIO*.
- Wamalwa Wambu, E., Pitalis, D., Domènech, C., Gil, A. S., Frau, F., Machunda, R., Pasape, L., & Barasa, S. S. (2017). *de-FLuoridation technologies for imprOving quality of WatEr and agRo-animal products along the East African Rift Valley in the context of aDaptation to climate change*.



## ANEXOS

### ANEXO A: NTE INEN 1108:2020

**TABLA 1. Requisitos físicos y químicos del agua para consumo humano**

Parámetro	Unidad	Límite permitido <sup>b</sup>	Método de ensayo <sup>c</sup>
Arsénico	mg/L	0,01	Standard Methods 3114
Cadmio	mg/L	0,003	Standard Methods 3113
Cloro libre residual	mg/L	0,3 a 1,5	Standard Methods 4500 Cl <sup>-</sup>
Cobre	mg/L	2,0	Standard Methods 3111
Color aparente	Pt-Co	15	Standard Methods 2120
Cromo (cromo total)	mg/L	0,05	Standard Methods 3113
Fluoruro	mg/L	1,5	Standard Methods 4500-F <sup>-</sup>
Mercurio	mg/L	0,006	Standard Methods 3112
Nitratos (como NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	mg/L	50,0	Standard Methods 4500-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
Nitritos (como NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> )	mg/L	3,0	Standard Methods 4500-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>
Plomo	mg/L	0,01	Standard Methods 3113
Turbiedad <sup>a</sup>	NTU	5	Standard Methods 2130

<sup>a</sup> Se conoce también como *Turbidez*.

<sup>b</sup> Los resultados obtenidos deben expresarse con el mismo número de cifras significativas de los límites permitidos, aplicando las reglas para redondear números indicadas en NTE INEN 52.

<sup>c</sup> En el caso de que sean usados métodos de ensayo alternativos a los señalados, estos deben ser normalizados. En el caso de no ser un método normalizado, este debe ser validado.

**TABLA 2. Requisitos microbiológicos del agua para consumo humano**

Parámetro	Unidad	Límite permitido	Método de ensayo <sup>a</sup>
Coliformes fecales	Número/100 mL	Ausencia	Standard Methods 9221 <sup>b</sup> Standard Methods 9222 <sup>c</sup>
<i>Cryptosporidium</i>	Número de ooquistes/ L	Ausencia	EPA 1623
<i>Giardia</i>	Número de quistes/ L	Ausencia	EPA 1623

<sup>a</sup> En el caso de que sean usados métodos de ensayo alternativos a los señalados, estos deben ser normalizados. En el caso de no ser un método normalizado, este debe ser validado.

<sup>b</sup> La ausencia corresponde a " $< 1,1$  NMP/100 mL".

<sup>c</sup> La ausencia corresponde a " $< 1$  UFC/100 mL".

**TABLA B.1. Rango de pH del agua para consumo humano**

Parámetro	Unidad	Rango
pH <sup>a</sup>	Unidades de pH	6,5 – 8,0

<sup>a</sup> Parámetro de control operativo

ANEXO B: TULSMA, LIBRO VI, ANEXO 1

TABLA 1. Límites máximos permisibles para aguas de consumo humano y uso doméstico, que únicamente requieren tratamiento convencional.

Parámetros	Expresado Como	Unidad	Límite Máximo Permissible
Aceites y Grasas	Sustancias solubles en hexano	mg/l	0,3
Aluminio	Al	mg/l	0,2
Amoniaco	N-Amoniacal	mg/l	1,0
Amonio	NH <sub>4</sub>	mg/l	0,05
Arsénico (total)	As	mg/l	0,05
Bario	Ba	mg/l	1,0
Cadmio	Cd	mg/l	0,01
Cianuro (total)	CN <sup>-</sup>	mg/l	0,1
Cloruro	Cl	mg/l	250
Cobre	Cu	mg/l	1,0
Coliformes Totales	nmp/100 ml		3 000
Coliformes Fecales	nmp/100 ml		600
Color	color real	unidades de color	100
Compuestos fenólicos	Fenol	mg/l	0,002
Cromo hexavalente	Cr <sup>+6</sup>	mg/l	0,05
Demanda Bioquímica de Oxígeno (5 días)	DBO <sub>5</sub>	mg/l	2,0
Dureza	CaCO <sub>3</sub>	mg/l	500

Parámetros	Expresado Como	Unidad	Límite Máximo Permissible
Bifenilo policlorados/PCBs	Concentración de PCBs totales	µg/l	0,0005
Fluoruro (total)	F	mg/l	1,5
Hierro (total)	Fe	mg/l	1,0
Manganeso (total)	Mn	mg/l	0,1
Materia flotante			<b>Ausencia</b>
Mercurio (total)	Hg	mg/l	0,001
Nitrato	N-Nitrato	mg/l	10,0
Nitrito	N-Nitrito	mg/l	1,0
Olor y sabor			Es permitido olor y sabor removible por tratamiento convencional
Oxígeno disuelto	O.D.	mg/l	No menor al 80% del oxígeno de saturación y no menor a 6mg/l
Plata (total)	Ag	mg/l	0,05
Plomo (total)	Pb	mg/l	0,05
Potencial de hidrógeno	pH		6-9
Selenio (total)	Se	mg/l	0,01
Sodio	Na	mg/l	200
Sólidos disueltos totales		mg/l	1 000
Sulfatos	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	mg/l	400
Temperatura		°C	Condición Natural ± 0 – 3 grados
Tensoactivos	Sustancias activas al azul de metileno	mg/l	0,5
Turbiedad		UTN	100
Zinc	Zn	mg/l	5,0

## ANEXO C: Procedimiento fluoruros



### PROCEDIMIENTO CON DR/2010

### FLUORURO

#### Método 8029

Para agua, aguas residuales y agua de mar

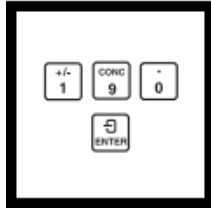
Aceptado por la USEPA para realizar informes sobre análisis de aguas residuales y agua potable (requiere destilación)\*\*

#### Método SPADNS\*

(0 a 2,00 mg/l F<sup>-</sup>)

\* Adaptado de *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (Métodos estándar para el análisis de agua y aguas residuales).

\*\* El procedimiento es equivalente a Métodos estándar 4500F-B,D para agua potable y aguas.

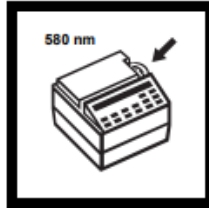


1. Ingresar el número de programa almacenado para fluoruro (F<sup>-</sup>).

Presionar: **1 9 0 ENTER**

La pantalla mostrará:  
**Fijar nm par 580**

*Nota: No se puede utilizar la celda de flujo continuo con este procedimiento.*



2. Girar el cuadrante de longitud de onda hasta que la pantalla pequeña muestre:

**580 nm**

Cuando se ajuste la longitud de onda correcta, en la pantalla aparecerá rápidamente:

**Muestra cero**

luego:

**mg/L F<sup>-</sup>**



3. Insertar el elevador de celda para celdas de 10 ml en el compartimento para celdas.



4. Medir y colocar 10,0 ml de muestra en una celda de muestra de 10 ml (la muestra preparada).

*Nota: Utilizar un cilindro o pipeta graduada.*



5. Medir y colocar 10,0 ml de agua desionizada en una segunda celda de muestra seca (el blanco).

*Nota: Utilizar un cilindro o pipeta graduada.*

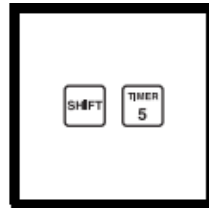
*Nota: La muestra y el blanco deben estar a la misma temperatura ( $\pm 1$  °C). Los ajustes de temperatura se pueden realizar antes o después de agregar el reactivo.*



6. Colocar 2,00 ml de reactivo SPADNS con la pipeta en cada celda. Girar para mezclar.

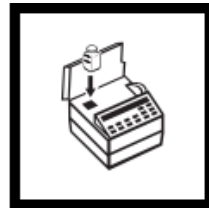
*Nota: El reactivo SPADNS es tóxico y corrosivo; se debe tener cuidado al medir.*

*Nota: El reactivo SPADNS se debe medir con exactitud.*



7. Presionar:  
**SHIFT TIMER**

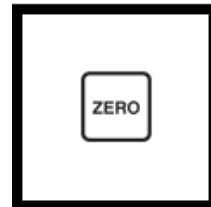
Comenzará un período de reacción de un minuto.



8. Cuando suene el cronómetro, la pantalla mostrará:

**mg/L F<sup>-</sup>**

Colocar el blanco en el soporte de celdas. Cerrar el escudo para la luz.



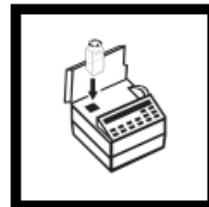
9. Presionar: **ZERO**

La pantalla mostrará:

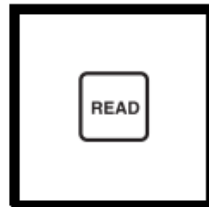
**Puesta a cero**

luego:

**0.00 mg/L F<sup>-</sup>**



10. Colocar la muestra preparada en el soporte de celdas. Cerrar el escudo para la luz.



11. Presionar: **READ**

La pantalla mostrará:

**Leyendo...**

luego se mostrará el resultado en mg/l F<sup>-</sup>.

**ANEXO D: Planta “El Tambo” – tratamiento actual**



a. Proceso de Tratamiento



b. tanque de filtración con grava



c. tanques de almacenamiento



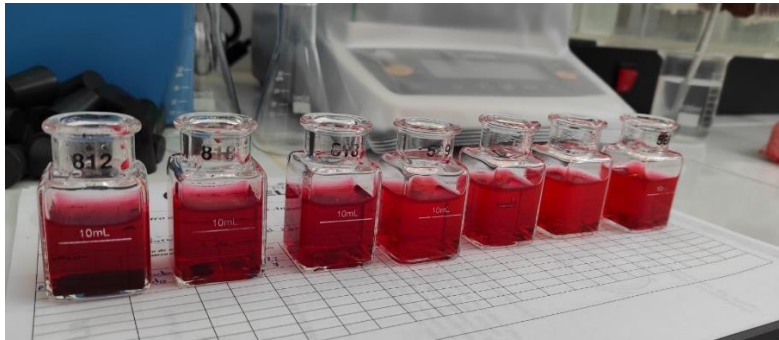
d. canaletas de aireación



e. ingreso del agua al tratamiento

## ANEXO E: Pruebas de tratabilidad

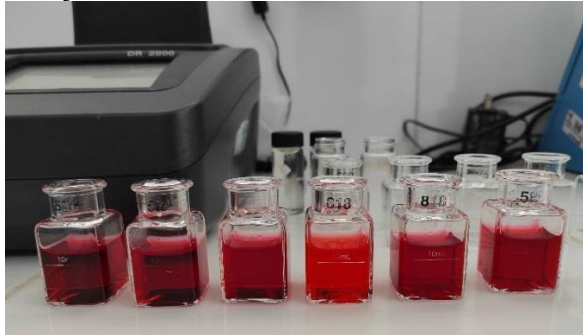
*NOTA: mientras más rojo claro se tiñe la solución la presencia de fluoruros en la muestra es mayor.*



f. Análisis de laboratorio de fluoruros de las muestras tomadas del test de jarras con cal



g. Test de jarras con oxido de aluminio – alúmina activada



h. Análisis de fluoruros del proceso del intercambio iónico Vs la osmosis inversa

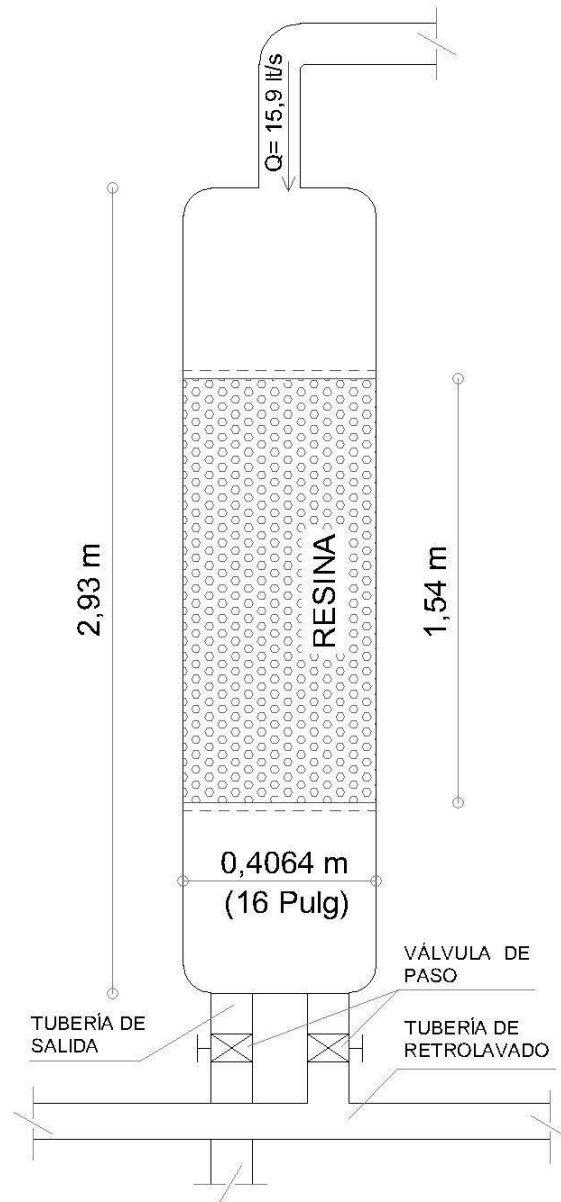


i. Análisis de fluoruros del filtro al vacío con oxido de aluminio

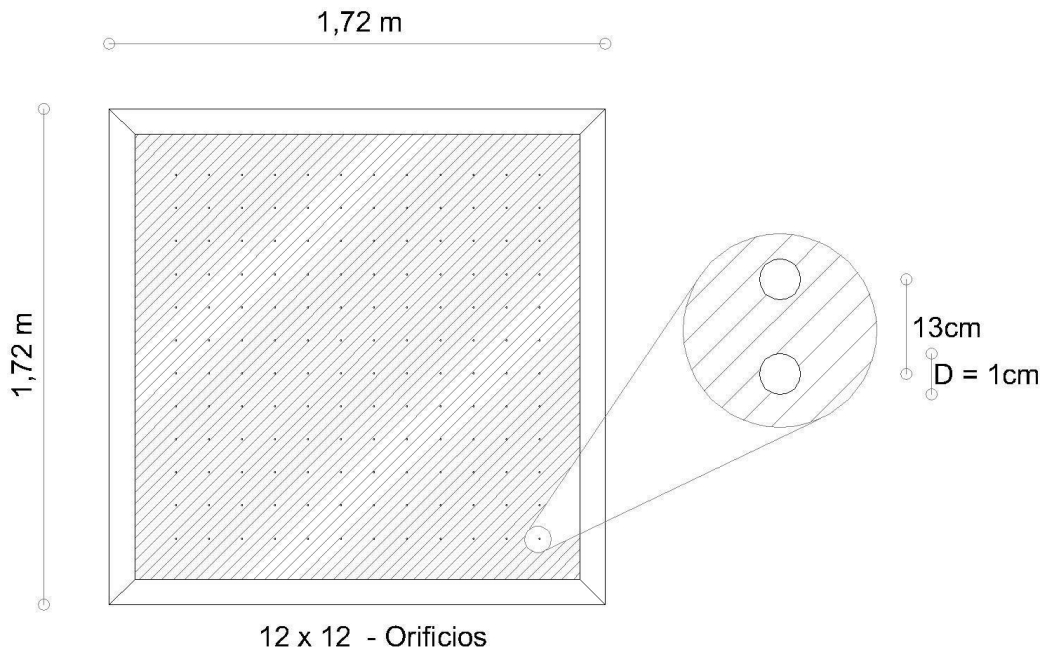
**ANEXO F: Comparación resultados de laboratorio inicial, final y norma.**

Parámetros analizados	Unidad	Concentración inicial	Concentración final	Norma INEN 1108
pH	pH	7.8	6.8	6.5 – 8.0
Turbidez	NTU	0.12	0.15	5 NTU
Conductividad	µs/cm	641	120	-
Sólidos Disueltos Totales	mg/l	312	62	-
Salinidad	%	0.3	0.1	-
Cobre	mg/l	0	0.02	-
Color	Pt/Co	0	0	15 unidades Pt/Co
Arsénico	mg/l	10	0	0.01 mg/l
Cloruros	mg/l	14.8	0.8	-
Dureza Total	mg/l	250	0	-
Fluoruro	mg/l	2	0.45	1.5 mg/l
Fosfatos	mg/l	9.25	9.55	-
Hierro	mg/l	0.29	0.29	-
Nitritos	mg/l	0.005	0.005	3.0 mg/l
Nitratos	mg/l	3.1	0.8	50.0 mg/l
Nitrógeno amoniacal	mg/l	0	0	-
Sulfatos	mg/l	29	0	-
Cobalto	mg/l	0	0	-
Níquel	mg/l	0	0	-
Cloro residual	mg/l	0.91	0	0.3 – 1.5
Zinc	mg/l	0.03	0.03	-
Coliformes Fecales	UFC/100ml	31	0	<1* UFC/100ml
Coliformes Totales	UC/100ml	>200	0	-

**ANEXO G: Planos del rediseño**



**DETALLE EN CORTE - COLUMNA  
DE INTERCAMBIO IÓNICO  
ESC: S / N**



DETALLE EN PLANTA - BANDEJA  
DE AIREACIÓN