

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA E INGENIERÍA DE ALIMENTOS



**“Propuesta de un sistema de tratamiento para disminuir fluoruros del agua del pozo de Caserío Escamil, Cantón Santa Rosa, Agua Caliente, Chalatenango”**

PRESENTADO POR:

JULIO JOSÉ BENÍTEZ CAÑAS

LUIS EDUARDO PACHECO GONZÁLEZ

CARLOS ADALBERTO SANDOVAL BLANCO

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO QUÍMICO

CIUDAD UNIVERSITARIA, ENERO 2017

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**

**RECTOR INTERINO :**

**LIC. JOSÉ LUIS ARGUETA ANTILLÓN**

**SECRETARIA GENERAL :**

**DRA. ANA LETICIA ZAVALA DE AMAYA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**

**DECANO :**

**ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL**

**SECRETARIO :**

**ING. JULIO ALBERTO PORTILLO**

**ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA E INGENIERÍA DE ALIMENTOS**

**DIRECTORA :**

**INGA. TANIA TORRES RIVERA**

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA E INGENIERÍA DE ALIMENTOS

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

**INGENIERO QUÍMICO**

Título:

**“Propuesta de un sistema de tratamiento para disminuir fluoruros del agua del pozo de Caserío Escamil, Cantón Santa Rosa, Agua Caliente, Chalatenango”**

Presentado por:

**JULIO JOSÉ BENÍTEZ CAÑAS**

**LUIS EDUARDO PACHECO GONZÁLEZ**

**CARLOS ADALBERTO SANDOVAL BLANCO**

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor:

**INGA. EUGENIA SALVADORA GAMERO DE AYALA**

San Salvador, enero 2017

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor:

**INGA. EUGENIA SALVADORA GAMERO DE AYALA**

## Agradecimientos

Agradecemos profundamente a Dios Todopoderoso, por permitirnos avanzar un peldaño más en nuestra formación profesional y nuestra superación personal. Por iluminarnos en el camino hacia nuestro futuro y fortalecernos en la lucha por alcanzar nuestras metas.

A nuestros padres, que con su esfuerzo y dedicación nos han impulsado hasta esta etapa de nuestra carrera y nos han apoyado en todo el trabajo realizado durante esta investigación.

A los docentes de la Escuela de Ingeniería Química e Ingeniería de Alimentos, por realizar tan noble labor de transmitirnos sus conocimientos y experiencias, dando como fruto este trabajo de investigación y muchos éxitos más que nos aguardan en nuestro porvenir.

A Ada Cecilia Tejada Rivera, Carlos Rivera y demás habitantes del Caserío Escamil, porque sin ellos este trabajo de graduación no hubiese sido posible. Por la disposición de colaborarnos en cada una de las etapas de nuestra investigación, por proporcionar toda la información necesaria y por confiar en nuestro equipo de trabajo esta investigación con impacto en su comunidad y demás comunidades que se ven afectadas por este mismo fenómeno.

A Ing. Eugenia Gamero de Ayala por acompañar, orientar y asesorar nuestra investigación. Por ser también nuestra animadora ante las dificultades que logramos superar.

A Ing. Tania Torres Rivera, por apoyarnos y transmitirnos sus conocimientos en la etapa del desarrollo experimental de este trabajo de graduación y ayudarnos a mejorar la calidad de nuestra investigación.

## DEDICATORIA

A:

**Dios**, por darme la salud y fortaleza para enfrentar cualquier reto, por iluminar mi mente y corazón para enfrentar los problemas y permitirme llegar hasta esta etapa de mi vida y culminar mi carrera, gracias por cuidarme a cada momento y por todas las bendiciones que he recibido en este largo camino,

Mi madre **Flor Maricela Cañas** y mi padre **Julio Antonio Benítez** por todos los sacrificios que han hecho para que pueda cumplir mis sueños, por el amor incondicional que he recibido, por guiarme, aconsejarme y corregirme, por ser el soporte fundamental en mi vida y brindarme tanto apoyo, ánimos y consuelo en los momentos más difíciles, por creer en mí y haber formado una persona con valores y convicción y que con su ejemplo me han enseñado que las mejores cosas en la vida son las que se logran con trabajo y esfuerzo, este logro es gracias a ustedes!.

Mis hermanos **Ana Marisela** y **Heber Josué** por estar a mi lado para compartir los momentos buenos y malos, por darme ánimo para seguir adelante y apoyarme solo como un hermano lo puede hacer ya que entre risas y bromas siempre hemos estado para apoyarnos entre nosotros.

Mi tía **Celia Querubina Cañas** que siempre me ha aconsejado y me ha dado ánimos para que le pusiera más empeño al estudio, por estar siempre velando por mi bienestar, salud, por enseñarme y guiarme desde mi infancia, gracias porque muchas metas que han sido cumplidas como lo es culminar mi carrera han sido gracias a su apoyo y cariño incondicional.

Mi abuelo **José Antonio Cañas** (QEPD) por todos los consejos que recibí de su parte ya que siempre trato de infundir valores y transmitir su sabiduría al platicar conmigo, gracias por el apoyo y cariño, siempre lo recordaré.

Mis familiares que siempre han estado pendiente de mí, preguntando a mis padres como estoy y controlándome por redes sociales, gracias por su apoyo y cariño incondicional, y que a pesar de la distancia siempre estaremos juntos como familia.

Mis Compañeros y amigos: **Erick, Melissa, Celeste, Ruben** y **Adalberto**, por todos esos momentos que pasamos juntos estudiando y desvelándonos haciendo tareas a último momento,

darnos ánimo para seguir adelante, siempre recordaré todas esas experiencias que compartimos juntos la vida nos llevará por diferentes caminos ya sea para alejarnos o acercarnos y solo puedo darles las gracias por compartir su tiempo conmigo y haberles conocido ha sido un placer.

Mis compañeros de tesis y amigos **Adalberto Sandoval** y **Luis Pacheco**, el terminar este trabajo de graduación es un logro que hemos alcanzado juntos y a pesar de las altas y bajas hemos salido adelante como equipo y que más decirles que ha sido un gusto trabajar con ustedes son dos personas maravillosas que he tenido la dicha de conocer.

Mis maestros por compartir sus conocimientos, por incentivar ese espíritu de investigación y desarrollo, por despertar el interés en cada temática vista durante toda la carrera, gracias por impulsar el desarrollo de mi formación profesional.

**Julio José Benítez Cañas**

## DEDICATORIA

A Dios por todas las bendiciones que me ha regalado y por todas las que vendrán. Por enseñarme que el camino no siempre es como uno desea pero que al final los caminos más difíciles son los que te hacen crecer y madurar como persona, y al superarlos son los que representan mayores alegrías y satisfacciones. Esta lucha la he conseguido gracias a su amor, a la fuerza de perseverancia y a la sabiduría otorgada por su inmensa e infinita misericordia y haberme permitido finalizar mi carrera.

A mi familia por su amor incondicional. En especial a mis padres **Olga González** y **Héctor Pacheco** por siempre apoyarme y nunca pero nunca dejarme solo en los momentos que pensé desistir, gracias mamá por siempre darme ese apoyo y consuelo que siempre necesite, por darme el aliento de decirme que faltaba poco que quizás para mi fueron los momentos más largos pero sin esos ánimos no hubiera seguido adelante. Gracias a mi papá (Juancho Camaney) por enseñarme que de cada error, cada fracaso, cada perdida no es más que un aprendizaje en la vida para no volverlo a repetir, para levantar la cara y enfrentar el mundo. A mis hermanos **Héctor** y **Vero** porque aunque sea molestando hacían que no desistiera, que confiara en mí mismo, que nunca dejara de dar lo mejor de mí y que soy capaz de lograr todo lo que me proponga. Gracias.

A mis compañeros y amigos que en el transcurso de la carrera estuvieron al lado mío, riendo, molestando, apoyando y por todo lo que vivimos. Por todas las noches de desvelo, por todas las alegrías y tristezas que pasamos, en especial a **Loren, Ulises, Tirza, Ángel, Eddy, Ronco, Marijox** y cómo olvidar a **Erick** (Paradise), gracias por todo a todos. Agradecer de manera especial a **Karlita Acosta** por ser alguien que siempre ha creído en mis capacidades inclusive cuando era yo quien menos creía en mí, gracias por compartir todo en esos tiempos difíciles, siempre contarás conmigo.

A mis compañeros y amigos de tesis **Julio Benítez** y **Sandoval Blanco**, tuvimos bajas y altas pero al fin podemos decir que hemos hecho un buen trabajo y decir que lo concluimos de una manera más que gratificante.

A mis maestros por todo ese conocimiento transferido a lo largo de la carrera, en especial a mi asesora **Ing. Eugenia Gamero** por tenernos paciencia, por brindarnos su apoyo y motivación, su conocimiento y su valioso tiempo. A **Ing. Tania Torres** por ayudarnos y apoyarnos a la

elaboración de nuestro trabajo de graduación, por todo el tiempo brindado, gracias. A **Ing. Delmy Rico** por hacer que se despertara en mí el interés a querer saber siempre más, por siempre apoyarnos a lo largo de la carrera.

*“Si no puedes volar entonces corre, si no puedes correr entonces camina, si no puedes caminar entonces arrástrate, pero haz lo que puedas, sigue moviéndote hacia adelante”.*

Martin Luther King

**Luis Eduardo Pacheco González**

## **DEDICATORIA**

A mis padres, por su apoyo incondicional en cada una de las etapas de mi vida, especialmente en mi carrera universitaria y en este trabajo de investigación, por apoyarme, animarme, corregirme, impulsarme con tanto amor para lograr formar de mí una persona con metas y objetivos claros.

A mi familia, porque a pesar de las dificultades no me ha faltado nada, puesto que no ha habido nada que una familia tan grande y unida no pueda solventar. Por estar presentes y compartir mis logros.

A Josseline Nathalie Valencia, por su compañía, cariño y apoyo incondicional durante este trabajo de graduación y durante estos cuatro años que ha llenado de alegrías. Por estar conmigo en las malas y en las buenas, por darme ánimos cuando lo que he necesitado y celebrar conmigo cuando he alcanzado un logro.

A Carlos Armando, Carlos Arturo, Carlos Juan, Jorge Arturo, María del Rosario, Carlos Fernando, Marta Beatriz, Claudia Adela, Dina Blanco, Concepción de María, Abelina Sandoval, Mauricio Eduardo, Lourdes Beatriz, Elmer Wilfredo, José Rubén y Sara María, por ser de las personas más cercanas y allegadas que he tenido desde mi niñez, y sé que lo seguirán siendo durante toda mi vida. Por estar pendientes de mi formación y de mi desarrollo personal.

A Ronald Valencia, por ayudarme a forjar mi carácter, brindarme sus consejos y animarme a llegar lejos en mi camino de superación.

A mis amigos, que en un principio fueron compañeros de estudio o trabajo, pero que se volvieron parte importante de mi vida y que me han colaborado de forma directa o indirecta para alcanzar este peldaño en mi formación profesional.

A mis compañeros de trabajo de graduación y amigos, Luis Pacheco González y Julio José Benítez, con los que comparto la alegría de alcanzar este logro, con los que he caminado hasta esta etapa de mi carrera apoyándome de ellos y tratando de ser su apoyo, con quienes logramos que las fortalezas de uno solventaran las debilidades del otro. Y estar más cerca de alcanzar algunas de nuestras metas.

**Carlos Adalberto Sandoval Blanco**

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE FIGURAS	xiii
ÍNDICE DE TABLAS	xvii
RESUMEN	xx
INTRODUCCIÓN	xxii
ANTECEDENTES	xxiv
CAPÍTULO 1. EFECTOS DE LOS FLUORUROS EN LA SALUD HUMANA	1
1.1 PROBLEMÁTICA GENERAL DE LA CONTAMINACIÓN DE AGUA PARA CONSUMO HUMANO EN EL SALVADOR	1
1.2 DETERMINACIÓN DEL IMPACTO A LA SALUD POR LA INGESTA DE AGUA CONTAMINADA POR FLUORUROS	4
1.3 DETERMINACIÓN DE POSIBLES FUENTES DE CONTAMINACIÓN DE FLÚOR EN EL AGUA DEL POZO DEL CASERÍO ESCAMIL	8
1.3.1 Tipo de suelo de la zona de estudio	12
1.3.2 Posibles fuentes de contaminación	15
1.3.2.1 Fuentes naturales de contaminación	16
1.3.2.2 Las fuentes antropogénicas de contaminación	17
1.3.3 Posibles fuentes de contaminación de flúor en el agua del pozo del caserío Escamil	22
CAPÍTULO 2. MÉTODOS DE REDUCCIÓN DE FLUORUROS EN AGUAS PARA CONSUMO HUMANO PROVENIENTE DE POZOS	23
2.1 REDUCCIÓN DE FLUORUROS CON HUESO BOVINO PULVERIZADO	23
2.1.1 Hueso bovino pulverizado	24
2.1.1.1 Tratamiento con soda cáustica	25
2.1.2 Experiencias en la reducción de fluoruros con hueso pulverizado en Sonora	25

2.2	REDUCCIÓN DE FLUORUROS CON HUESO BOVINO PULVERIZADO Y CALCINADO	28
2.2.1	Hueso calcinado	28
2.2.2	Tratamiento del Hueso	29
2.2.2.1	Tratamiento térmico	29
2.2.3	Experiencias en Plantas de Tratamiento	29
2.2.3.1	Lecho desfluorante	29
2.2.3.2	Técnica de desfluoración	30
2.2.3.3	Técnica de regeneración del hueso	30
2.2.3.4	Efluentes del proceso de regeneración	31
2.3	MÉTODOS UTILIZADOS PARA LA REDUCCIÓN DE FLUORURO	31
2.3.1	Reducción de fluoruros con cal	31
2.3.2	Reducción de fluoruros por coagulación con sulfato de aluminio y otros coagulantes	32
2.3.3	Alúmina activada	33
2.3.4	Técnica Nalgonda	34
2.3.5	Precipitación por contacto	35
2.4	SISTEMAS DE TRATAMIENTO UTILIZADOS PARA ACONDICIONAR AGUAS SUBTERRÁNEAS	36
2.4.1	Aguas subterráneas aeróbicas	38
2.4.2	Aguas subterráneas ligeramente anaerobias	40
2.4.3	Aguas subterráneas profundas anaeróbicas	41
2.5	DESCARGA DE AGUAS RESIDUALES A CUERPOS RECEPTORES	43
2.6	CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES GRANULARES	44

2.6.1.	Granulometría	45
2.6.2	Porosidad	46
2.6.3	Permeabilidad	46
CAPÍTULO 3. DISEÑO DE EXPERIMENTOS PARA REDUCIR FLUORUROS EN AGUA DE POZO		48
3.1	METODOLOGÍA ESTÁNDAR PARA LA TOMA Y PRESERVACIÓN DE LA MUESTRA	49
3.1.1	Ubicación del punto de muestreo	49
3.1.2	Tiempo y frecuencia del muestreo	49
3.1.3	Volumen de muestras	50
3.1.4	Selección de envases	50
3.1.5	Procedimiento de recolección	50
3.1.6	Transporte, preservación y conservación de las muestras	51
3.2	CARACTERIZACIÓN DEL AGUA DEL POZO Y ANÁLISIS DE FLUORUROS A LAS MUESTRAS	51
3.2.1	Caracterización del agua del pozo	52
3.2.2	Análisis de fluoruros a las muestras	52
3.3	METODOLOGÍA PARA LA REMOCIÓN DE FLUORUROS	53
3.3.1	Pruebas de efectividad de remoción de fluoruros	55
3.3.2	Prueba preliminar del sistema de remoción	59
3.3.2.1	Preparación del hueso	60
3.3.2.2	Elaboración del sistema de tratamiento preliminar	61
3.3.2.3	Procedimiento para determinar la reducción de fluoruros utilizando el sistema de tratamiento preliminar	63
3.4	DISEÑO FACTORIAL DEL TIPO $2^k$	68

3.4.1	Procedimiento experimental para la determinación de significancia de los efectos en la variable respuesta	71
3.4.2	Resultados obtenidos en el procedimiento experimental para la determinación de significancia de los efectos en la variable respuesta	74
3.5	OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA DE REMOCIÓN DE FLÚOR	77
3.6	EXPERIMENTO ÓPTIMO	79
3.6.1	Montaje experimental	79
3.6.2	Procedimiento para determinar la reducción de fluoruros utilizando el sistema de tratamiento preliminar	82
CAPÍTULO 4. DISEÑO DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO PARA DISMINUIR FLUORUROS DE AGUA DE POZO		85
4.1	DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE TRATAMIENTO EXPERIMENTAL	87
4.2	MEJORAS PROPUESTAS AL SISTEMA EXPERIMENTAL	90
4.3	PROPUESTA DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO PARA DISMINUIR FLUORUROS DEL AGUA DEL POZO DE CASERÍO ESCAMIL	92
4.3.1	Caracterización de materias primas	92
4.3.1.1	Carbón de hueso bovino	93
4.3.1.2	Grava sílica	94
4.3.1.3	Arena sílica	95
4.3.1.4	Carbón activado	97
4.3.1.5	Grava	97
4.3.2	Diseño del sistema de tratamiento	98
4.3.2.1	Montaje del sistema de tratamiento de agua	99
4.3.3	Mantenimiento del sistema de tratamiento	103
4.3.3.1	Carbón de hueso molido	103

4.3.3.2	Carbón activado	104
4.3.3.3	Demás material filtrante	105
CAPÍTULO 5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS		105
5.1	DETERMINACIÓN DE TEMPERATURAS DE CALCINACIÓN	106
5.2	DISEÑO EXPERIMENTAL PRELIMINAR	107
5.3	DISEÑO DE EXPERIMENTOS Y OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA	107
CONCLUSIONES		111
RECOMENDACIONES		113
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		115
ANEXOS		118
Anexo 1	Carta de la Asociación de Desarrollo Comunal del Caserío Escamil dirigida a la Escuela de Ingeniería Química e Ingeniería de Alimentos	119
Anexo 2	Resultado análisis de fluoruros, muestra de agua de pozo del Caserío Escamil, realizado por el Laboratorio Físicoquímico de Aguas, febrero 2016	121
Anexo 3	Requisitos de envases para muestras de agua	123
Anexo 4	Requisitos de tiempo máximo de almacenamiento y condiciones de preservación de muestras	125
Anexo 5	Manual de prácticas de laboratorio	128
Anexo 6	Resultado de análisis físicoquímico de prueba preliminar, Laboratorio de Aguas de la Facultad de Química y Farmacia	160
Anexo 7	Resultado de análisis físicoquímico de prueba preliminar, Ecochem S.A. de C.V	163
Anexo 8	Resultado de análisis físicoquímico en agua de pozo de caserío Escamil, cantón Santa Rosa, Chalatenango, por Centro de Control de Calidad Industrial S.A. de C.V. en septiembre de 2011	165

Anexo 9	Resultado de análisis fisicoquímico de prueba final con valores óptimos, Laboratorio de Aguas de la Facultad de Química y Farmacia	167
Anexo 10	Resultado de análisis fisicoquímico de prueba final con valores óptimos, realizados por Ecochem S.A. de C.V	172

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Mapa de relieve que muestra el caserío Escamil y sus alrededores	10
Figura 1.2	Croquis de ubicación del caserío Escamil	11
Figura 1.3	Tipo de suelo del caserío Escamil y sus alrededores (elaboración propia)	12
Figura 1.4	Vista panorámica de los alrededores de la zona de estudio	14
Figura 1.5	Alrededores del taque de almacenamiento	14
Figura 1.6	Cantidad total anual de fluoruros liberada al medio ambiente de origen industrial en Canadá	20
Figura 1.7	Cantidad total anual de fluoruros liberada al medio ambiente de origen industrial en los países bajos	21
Figura 1.8	Cantidad total anual de fluoruros liberada al medio ambiente de origen industrial en los Estados Unidos	21
Figura 1.9	Cantidad total anual de fluoruros liberada al medio ambiente de origen industrial de todos los sectores	22
Figura 2.1.	Concentración del fluoruro residual bajo diferentes intervalos de tiempo de contacto	27
Figura 2.2	Cascada de Aireación	39
Figura 2.3	Tratamiento de agua subterránea aeróbica	40
Figura 2.4	Tratamiento de agua subterránea ligeramente anaeróbica	41
Figura 2.5	Tratamiento de agua subterránea aeróbica profunda	42
Figura 2.6	Filtración en seco y Filtración rápida de arena	43

Figura 3.1	Medidor de fluoruros ExStick FL700	53
Figura 3.2	Esquema de la metodología utilizada en la fase experimental (elaboración propia)	54
Figura 3.3	Muestras de 50 g hueso calcinado en beakers de 1 L	56
Figura 3.4	Realización de prueba de jarras a muestras de hueso molido sin calcinar	57
Figura 3.5	Medición de fluoruros a muestras de hueso molido sin calcinar posterior a prueba de jarras	58
Figura 3.6	Muestra de agua de pozo tratada con hueso molido sin calcinar	59
Figura 3.7	Esquema de preparación de hueso bovino calcinado (elaboración propia)	60
Figura 3.8	Primera etapa de sistema de tratamiento utilizado en prueba preliminar	62
Figura 3.9	Segunda etapa de sistema de tratamiento utilizado en prueba preliminar	62
Figura 3.10	Tercera etapa de sistema de tratamiento utilizado en prueba preliminar	63
Figura 3.11	Recipiente de alimentación de sistema de tratamiento preliminar	63
Figura 3.12	Montaje de sistema de tratamiento preliminar	64
Figura 3.13	Toma de muestra a la salida del tratamiento preliminar	64
Figura 3.14	Medición de fluoruros de agua tratada	65
Figura 3.15	Medición de fluoruros de agua tratada	65

Figura 3.16	Medición de fluoruros en muestras tratadas con el sistema preliminar	66
Figura 3.17	Toma de muestras de agua tratada para su posterior análisis de laboratorio	67
Figura. 3.18	Bomba sumergible de 5 watts, y de 50 cm de cabeza de presión	69
Figura 3.19	Tabla de Yates para realización de experimentos del modelo 2k	70
Figura 3.20	Montaje para realización de experimentos variando factores	71
Figura 3.21	Alimentación de solución de fluoruros a sistema experimental	72
Figura 3.22	Circulación de agua fluorada por columna de 11 cm de hueso calcinado	72
Figura 3.23	Ejemplo de medición de fluoruros de agua tratada	73
Figura 3.24	Medición de fluoruros en agua tratada con recirculación	73
Figura 3.25	Diagrama de Pareto estandarizado para determinación de efectos significativos para reducción de fluoruros	75
Figura 3.26	Gráfica de efectos principales para reducción de fluoruros	77
Figura 3.27	Primera etapa de sistema de tratamiento experimental óptimo	80
Figura 3.28	Segunda etapa de sistema de tratamiento experimental óptimo	80
Figura 3.29	Tercera etapa de sistema tratamiento experimental óptimo	81
Figura 3.30	Montaje experimental de sistema de tratamiento con las condiciones óptimas	81
Figura 3.31	Medición de concentración de fluoruros para muestra de agua de pozo, previo a experimento óptimo	82

Figura 3.32	Recipiente de alimentación de sistema de tratamiento óptimo con bomba de 5 watts	83
Figura 3.33	Corrida de experimento óptimo	83
Figura 3.34	Recolección de agua tratada	84
Figura 3.35	Medición de fluoruros de agua tratada	84
Figura 4.1	Planos del sistema de tratamiento de aguas para disminuir fluoruros a nivel experimental	89
Figura 4.2	Equipo propuesto para sistema de tratamiento	98
Figura 4.3	Planos de propuesta del sistema de tratamiento de aguas para disminuir fluoruros de agua de pozo de caserío Escamil	971 102

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1	Valores máximos permisibles de fluoruros para descarga a un puerto receptor	43
Tabla 2.2	Requerimiento para toma de muestras recipientes para muestreo y preservantes de componentes en agua	44
Tabla 3.1	Caracterización de los principales parámetros del agua de pozo del caserío Escamil	52
Tabla 3.2	Mediciones de concentración de fluoruros obtenidas a distintos tiempos para cada temperatura de calcinación del hueso	56
Tabla 3.3	Eficiencias de remoción de fluoruros máximas alcanzadas por el hueso calcinado a distintas temperaturas	56
Tabla 3.4	Resultados de medición de fluoruros posterior a prueba de jarras	58
Tabla 3.5	Eficiencia de remoción de fluoruros de agua de pozo en muestras de hueso molido sin calcinar.	59
Tabla 3.6	Resultados obtenidos en agua tratada con el sistema preliminar.	67
Tabla 3.7	Resultados obtenidos en las muestras de agua tratada en la prueba preliminar	68
Tabla 3.8	Valores máximos y mínimos asignados a las variables para diseño experimental	69
Tabla 3.9	Secuencia de experimentos para diseño $2^k$ con los respectivos resultados alcanzados	74
Tabla 3.10	Efectos estimados de los factores para reducción de fluoruros	75
Tabla 3.11	Análisis de varianza para reducción de fluoruros	76

Tabla 3.12	Deseabilidad de los factores para optimizar la remoción de fluoruros	77
Tabla 3.13	Determinación de los factores óptimos para remoción de fluoruros	77
Tabla 3.14	Determinación del experimento óptimo	78
Tabla 3.15	Segmento de la tabla 3.9 (secuencia de experimentos para diseño $2^k$ con los respectivos resultados alcanzados)	79
Tabla 3.16	Resultados obtenidos en las muestras de agua tratada en la prueba final	85
Tabla 4.1	Propuesta de mejoras a sistema de tratamiento	90
Tabla 4.2	Composición de un hueso de toro desgrasado y seco	93
Tabla 4.3	Composición mineral de un hueso de bovino desgrasado y seco	94
Tabla 4.4	Composición química de la grava sílica	95
Tabla 4.5	Composición química de la arena sílica	96
Tabla 4.6	Composición química del carbón activado	97
Tabla 4.7	Costeo y mantenimiento del sistema de filtración	99
Tabla 4.8	Parámetros de operación del sistema de tratamiento propuesto	101
Tabla 5.1	Eficiencia de remoción de fluoruros a distintos tiempos de calcinación	106
Tabla 5.2	Resultados de análisis fisicoquímicos a muestras de agua tratadas durante la prueba preliminar	107
Tabla 5.3	Valores óptimos de los factores del diseño experimental para disminución de fluoruros	108

Tabla 5.4	Medición de fluoruros en agua tratada con el sistema experimental óptimo	108
Tabla 5.5	Resultados de análisis fisicoquímicos a muestras de agua tratadas con el sistema experimental	109
Tabla 5.6	Resultados de análisis realizados a muestras tratadas con el sistema experimental	110

## RESUMEN

La contaminación de aguas con fluoruros es un problema de carácter mundial que aqueja a muchas comunidades que debido a la carencia del vital líquido se ven obligados a utilizar las fuentes disponibles sea de pozos, ríos, entre otras, para consumo y tareas hogareñas, a pesar del desconocimiento de su calidad fisicoquímica y microbiológica.

Muchas de estas fuentes presentan valores altos de algunos parámetros que con el tiempo podrían ser perjudiciales para la salud, tal es el caso del flúor que puede estar presente en las aguas provenientes de pozos, su origen puede ser diferentes fuentes como: rocas de origen volcánico como mica, anfíboles, turmalinas y de origen industrial, provenientes de diferentes proceso de fabricación.

El agua del pozo ubicado en el caserío Escamil, cantón Santa Rosa, municipio de Agua Caliente, departamento de Chalatenango, presenta valores altos de flúor, de acuerdo a los análisis fisicoquímicos realizados a dicha agua, dicho valor no cumple con la Norma Salvadoreña, NSO 13.07.01:08 para agua potable, y el consumo de esta agua podría estar provocando daños en la salud de los habitantes de dicho caserío.

No se ha podido determinar la fuente de flúor, ya que de acuerdo al recorrido de campo que se realizó, no se encuentra ninguna industria en los alrededores pero si se pudo observar la presencia de aguas termales en caseríos circundantes por lo que se considera que la contaminación de fluoruros de las aguas del pozo del caserío podrían estar asociadas a este fenómeno.

El flúor puede ser removido de las aguas para consumo, por diferentes métodos, uno de los métodos consiste en la utilización de hueso bovino, dicho método fue el que se utilizó para la presente investigación, se preparó este material en dos formas, mediante métodos químicos con lavados con hidróxido de sodio y mediante tratamiento térmicos, lográndose demostrar cuan eficiente es el proceso de remoción utilizando ambos métodos aplicando una prueba de jarras utilizando muestras de hueso molido calcinado a diferentes temperaturas desde 450 °C a 650 °C y muestras de hueso molido desgrasado con soda caustica, aplicando a todas las muestras iguales condiciones de agitación, tiempo de contacto con el agua, volumen de agua y concentración de

fluoruro, resultando más eficiente el hueso bovino calcinado a temperatura de 450 °C, siendo el que se utilizara para la puesta en marcha de pruebas a nivel de laboratorio de un sistema de remoción de fluoruros.

Utilizando el hueso bovino calcinado se desarrolló un diseño de experimento de tipo factorial  $2^k$  a dos niveles para determinar el nivel de significancia que tienen los factores: caudal, altura del lecho de hueso bovino calcinado, recirculación y concentración inicial de fluoruros, los cuales intervienen en el proceso de remoción de fluoruros, para la realización del diseño de experimento se llevó a cabo una serie de dieciséis experimentos aleatorios para obtener valores de concentración final de fluoruros, los valores obtenidos fueron procesados en el programa Statgraphics obteniéndose como resultado el valor de la significancia de cada uno de los factores mencionados que intervinieron en el proceso de remoción y además se obtuvo la combinación óptima de estos factores que permitirán la máxima remoción de fluoruros en las aguas a tratar.

El sistema de tratamiento a escala de laboratorio elaborado a partir del análisis de los datos obtenido con el diseño de experimento consta de tres etapas, en la primera de ellas se da principalmente el proceso de remoción de fluoruros y tiene una columna de hueso bovino calcinado a temperatura de 450 °C con una altura de 23cm y un soporte de grava de 2.5 cm al fondo, en la segunda etapa del sistema se tienen dos columnas de material filtrante, una columna superior de arena sílica con una altura de 9 cm y una columna inferior de arena de río con una altura de 9 cm y un soporte de grava de 2.5 cm al fondo, y una tercera etapa con una columna de carbón activado con una altura de 11 cm en donde se da principalmente la remoción de color y olor del agua, además una columna de material filtrante de piedra pómez con una altura de 7 cm y un soporte de grava de 2.5 cm al fondo, además en esta tercera etapa se remueve en una menor proporción fluoruros.

A partir de los resultados obtenidos en la etapa experimental se plantea una propuesta de diseño para la elaboración de un sistema de tratamiento de aguas de pozo para ser implementado en el caserío Escamil, cantón Santa Rosa, municipio de Agua Caliente, departamento de Chalatenango

## INTRODUCCIÓN

En El Salvador los altos índices de contaminación en las fuentes de agua superficiales disponibles en el territorio nacional representa un reto para toda la sociedad. El Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales a partir de año 2006 efectúa un plan de monitoreo de la calidad y volumen de las aguas en 123 sitios de muestreo en 55 ríos distribuidos en el territorio nacional y para el año 2011 solo el 17% de los sitios muestreados cumple con los parámetros establecidos en el Decreto No. 51 con fecha 16 de Noviembre de 1987 como agua cruda para potabilización por métodos convencionales (MARN, 2011). Debido a la contaminación de las fuentes superficiales de agua, se presentan serios problemas de desabastecimiento de agua potable tanto en el área rural como urbana. En el área rural las aguas subterráneas están sujetas a contaminación debido a los residuos domésticos, las malas prácticas agrícolas y de ganadería. Es por ello que solo está quedando como única opción la explotación de aguas subterráneas profundas, a menos que se quiera invertir grandes cantidades de dinero para el tratamiento y desinfección de estas aguas contaminadas (Melgar Flores, Moya Turcios, y Polio Martínez, 2012).

El flúor es un elemento muy tóxico y reactivo. Se conocen alrededor de 170 minerales que contienen flúor. Los más abundantes son fluorita ( $\text{CaF}_2$ ) y apatita  $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F},\text{OH},\text{Cl},1/2\text{CO}_3)$ . Este último mineral es la principal fuente de fosfatos utilizados como fertilizantes.

La fluorosis dental es una anomalía de la cavidad oral, en especial de las piezas dentales, es una hipoplasia o hipomaduración del esmalte o dentina producida por la ingestión crónica o excesiva de fluoruro durante el período de formación del diente (IESPANA, 2013).

Es práctica común agregar fluoruro a las aguas para consumo humano para prevenir las caries. Sin embargo las concentraciones por encima de los 5 mg/L son perjudiciales para la salud. La concentración está limitada la Norma Salvadoreña, NSO 13.07.01:08, señala como concentración máxima de fluoruros en agua potable de 1.0 mg/L.

Existen varios métodos para la eliminación de fluoruro, como precipitación, adsorción, intercambio iónico y procesos de membrana como; osmosis inversa, nanofiltración,

electrodialisis y la técnica de Nalgonda que se basan en la adición de un álcali, cloruro, sulfato de aluminio o cloruro de aluminio o ambos.

La hidroxiapatita, ha sido usada como implante de hueso en dientes dada la composición química y estructura cristalográfica muy similar a estos tejidos duros del humano. La remoción de fluoruro puede realizarse utilizando hidroxiapatita, calcita, cuarzo, o bien, cuarzo activado por iones férricos (Valenzuela, Ramírez Hernández, Sol, y Reyes, Alternativas para la eliminación doméstica de fluor en el agua de consumo humano, 2010).

Con el desarrollo de esta investigación se pretende a nivel de laboratorio lograr la reducción de los niveles de fluoruros a valores permitidos por la norma NSO 13.07.01:08, para lograr este fin se utilizará un sistema de tratamiento de tres etapas conteniendo hueso calcinado proveniente de ganado bovino, arena sílica y arena de río, y carbón activado respectivamente y además, utilizando un soporte de grava en cada una de la etapas. La utilización del hueso bovino calcinado como intercambiador ionico para relaizar este tratamiento se debe a que presenta características físicas y químicas tales como la biocompatibilidad, no toxicidad, estabilidad química, osteoconducción y bioactividad convirtiéndolo en un material de incalculable valor ya que no produce alteraciones en las características del agua tratada, además la accesibilidad económica de la materia prima lo convierte en un componente idóneo para el tratamiento de este tipo de aguas en comunidades de escasos recursos económicos obteniéndose un alto rendimiento en la eliminación de fluoruro.

## ANTECEDENTES

En el año de 1997 se realizó en la Facultad de Química y Farmacia de la Universidad de El Salvador el trabajo de graduación sobre alternativas de solución para regular la concentración de fluoruros en las aguas de los municipios de Ozatlán y El Sauce, en el desarrollo de la investigación se efectuó el muestreo en las fuentes de agua de cada municipio, teniéndose para el municipio de Ozatlán seis puntos de muestreo pertenecientes a los 6 cantones del municipio y en el municipio de El Sauce se efectuó el muestreo en el área urbana encontrándose cinco puntos de muestreo pertenecientes a los barrios donde se registraron casos de fluorosis, los resultados de la determinación de fluoruro mediante potenciometría directa mostraron que en el municipio de Ozatlán se obtuvo un promedio general de 0.474 mg/L y en el municipio de El Sauce un promedio general de 2.198 mg/L, como medida para regular la concentración de flúor a los límites dentro del rango de 0.7 a 1.5 mg/L dados por la Organización Mundial de la Salud (OMS) se propuso un filtro con diversos materiales filtrantes como: arena, piedra pómez y grava que opera a una velocidad de lavado de 0.06 L/min cuya eficiencia se midió utilizando soluciones estándar de fluoruro de sodio con concentraciones iguales a las encontradas en los municipios en estudio obteniéndose un eficiencia en la remoción del flúor del agua en un porcentaje óptimo de 71.12%. (Ramírez, Castro, y Dominguez, 1997)

Para agosto del año 2002 se realizó un estudio impulsado por el MINSAL, en el que se analizó flúor en distinta fuentes de agua de consumo humano, en dicho estudio se consideraron todas las fuentes de agua que abastecieran a más de 2000 habitantes para garantizar la representatividad de la fuente, los resultados mostraron que 36 localidades tenían valores de flúor entre el rango de 0.51 a 1mg/L, valor que consideran como optimo y 5 localidades presentan concentraciones de flúor superiores a 1 mg/L, considerado como nivel alto, estas localidades representan el 12.4% de la población salvadoreña con riesgo de fluorosis, en el departamento de Chalatenango se analizaron 42 fuentes entre estas se hace mención únicamente del pozo del municipio de Zalitre ya que presento una concentración de 1.63 mg/L (Organización Panamericana de la Salud, 2002).

En el año 2004 se llevó a cabo un estudio de tipo descriptivo en el que se analizaron muestras de sal que se distribuyen comercialmente en diferentes zonas de San Salvador, en total se muestrearon 26 diferentes marcas registradas como las que no, la confrontación de los resultados

se efectuó con los valores de flúor recomendados por la Organización Mundial de la Salud (OMS) que oscilan en un rango de 180 a 220 mg/L, para lo cual se obtuvo que 21 de las muestras tenían concentraciones inferiores a lo recomendado por la OMS y 5 de las muestras analizadas presento valores superior al recomendado por la OMS, cabe mencionar que la muestra de sal que presento la mayor concentración con un valor de 417.24 mg/L (Girón, Márquez, y Sermeño, 2004).

En la Facultad de Química y Farmacia de la Universidad de El Salvador se efectuó un estudio en el año 2008 sobre la determinación de la concentración de flúor en la leche materna en los municipios de El Sauce y Ozatlán ubicados en la zona oriental de El Salvador, En dichas zonas se han efectuado investigaciones sobre la presencia de flúor en las aguas, encontrándose valores en el municipio de El Sauce de 2.19 mg/L y en Ozatlán de 0.474 mg/L, para la realización del estudio se recolectaron muestras de leche materna de mujeres en edades entre los 17 y 32 años para su posterior análisis por el método de potenciometría directa, los resultados obtenidos mostraron que la concentración de flúor en la leche materna para el municipio de Ozatlán fue de 0.0669 mg/L y en el municipio de El Sauce de 0.1159 mg/L, los resultados obtenidos de la concentración promedio de flúor en la leche materna en estos municipio sobrepasan los límites permitidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS) de 0.01 mg/L, atribuyendo dichos resultados a la exposición de las madres a concentraciones elevadas de fluoruros en la aguas para consumo, lo cual se evidencia en los resultados que muestran una concentración promedio de fluoruros en la leche materna en el municipio que tiene mayores concentraciones de fluoruros en sus aguas. (Roselia, Gómez Cedillos, y Rodriguez, 2008)

La determinación de fluoruros en aguas para consumo humano ha sido el objeto de estudio de distintos trabajos de graduación realizados en la Universidad de El Salvador, así que en el año 2008 se realizó la investigación en la Escuela de Química de la Facultad de Ciencias Naturales y Matemática sobre la determinación de fluoruros en aguas de consumo humano en los departamentos de Santa Ana y Chalatenango, la muestras se analizaron potenciométricamente usando un electrodo selectivo de ion específico para fluoruro, analizándose en el departamento de Santa Ana 27 muestras y 5 en el departamento de Chalatenango, los resultados mostraron que la mayoría de los lugares donde se tomó muestras no presentaba valores elevados de fluoruros oscilando entre 0.10 y 0.25 mg/L, además aquellos lugares donde se encontraron

valores apreciables de fluoruro corresponden a regiones montañosas, lo cual puede estar relacionado con la desintegración de rocas que contienen flúor, la concentración más alta en el agua se encontró en el departamento de Chalatenango en el cantón Salitre cuya fuente de agua era un nacimiento, presentando un valor de 2.07 mg/L lo cual deja un precedente de la presencia de fluoruros en la aguas de este departamento. (Hernández y Martínez, 2008)

En el departamento de Chalatenango se desarrolló un estudio para determinar los efectos del consumo crónico de agua hiperfluorada sobre el coeficiente intelectual el cual se llevó a cabo en los cantones de San Antonio y El Pinar, se hace mención de los casos de fluorosis detectados en el cantón Santa Rosa pero no fue incluido en su estudio, para el desarrollo del estudio se atendió a niños y niñas entre las edades de 5 a 9 años que asisten a los centros escolares correspondientes a cada cantón mediante controles y casos, los niños clasificados como casos fueron aquellos que presentaron fluorosis dental y el grupo de controles corresponde a los niños que no presentaron problemas por exposición a fluoruros, el grupo de casos fue pareado con el grupo de controles de acuerdo a la edad, sexo y nivel educativo, durante el desarrollo se efectuaron entrevista a los padres o encargados de los niños, se realizó test de matrices progresivas y se muestrearon las fuentes de ingesta del agua, los análisis presentados exponen que existe una diferencia en los resultados que se obtuvieron con el test de Raven con una tendencia a puntuar bajo en el Coeficiente Intelectual a los niños que han estado expuestos a fluoruros, además el estudio indica que existe un riesgo 7.7 veces mayor en la población expuesta a presentar una disminución en el coeficiente intelectual. (Iliana, Pérez Galdámez, y Vaquerano, 2010).

La asociación de Desarrollo Comunal (ADESCO) del Caserío Escamil, a través de su presidente Carlos Rivera Hidalgo, envió una carta con fecha 30 de enero de 2016 (ver anexo 1), dirigida a la Escuela de Ingeniería Química e Ingeniería de Alimentos informando su interés en la realización de un estudio de remoción de flúor en el pozo de la comunidad explicando la situación problemática que atraviesan en cuanto a la contaminación de su única fuente de agua. Con fines de evaluar el estado actual de la concentración de fluoruros de este pozo se envió para análisis una muestra al Laboratorio Físicoquímico de Aguas de la Facultad de Química y Farmacia de la Universidad de El Salvador, donde se analizó a través de método fotométrico

obteniéndose un valor para los fluoruros de 4.7 mg/L (ver anexo 2), reafirmando que el pozo mantiene una concentración de fluoruros que es perjudicial para la salud.

## **CAPÍTULO 1. EFECTOS DE LOS FLUORUROS EN LA SALUD HUMANA**

El flúor es un componente común de muchos minerales, incluyendo la apatita y la mica. Es práctica común agregar fluoruro a las aguas para consumo humano, para proporcionar un residuo de 1.5 – 2.5 mg/L de fluoruros, el cual ayuda a prevenir las caries. Sin embargo las concentraciones por encima de los 5 mg/L son perjudiciales para la salud, principalmente en los dientes ya que causa estructura dental quebradiza y manchada (Nalco Chemical Company). La concentración está limitada en los estándares para agua potable, para el caso de la Norma Salvadoreña, NSO 13.07.01:08, señala como concentración máxima de fluoruros en agua potable de 1.0 mg/L (Organismo Salvadoreño de Normalización, 2009).

En el caserío Escamil, del cantón Santa Rosa, municipio de Agua Caliente, departamento de Chalatenango; se ubica un pozo que fue construido por la Asociación Nacional de Acueductos y Alcantarillados (ANDA), hace 25 años, el cual abastece de agua a toda la comunidad del caserío Escamil y a una parte del caserío Santa Rosa, además es utilizado para diversas actividades de tipo doméstico. Aproximadamente desde hace siete años, el agua extraída de este pozo no se puede utilizar para consumo humano, debido a que se detectó la presencia de grandes cantidades de fluoruros, en un análisis solicitado por la Unidad Comunitaria de Salud Familiar Agua Caliente; en donde se obtuvo un valor superior al límite máximo permitido por la Norma Salvadoreña para agua potable (NSO 13.07.01:08), esto se manifestó en problemas dentales, principalmente en niños. Cabe aclarar que el agua de dicho pozo siempre se sigue utilizando para otras actividades tales como: domésticas, consumo para el ganado y otros animales de los lugareños, así como para actividades agrícolas.

### **1.1 PROBLEMÁTICA GENERAL DE LA CONTAMINACIÓN DE AGUA PARA CONSUMO HUMANO EN EL SALVADOR**

En El Salvador la densidad poblacional es cada vez mayor. Lo que exige una mayor explotación de recursos, en especial del recurso hídrico que es tan necesario para el diario vivir. Un aumento en la población requiere un incremento de agua explotada para consumo, así como también para dilución de los desechos generados por toda actividad humana. Tomando en cuenta también que un aumento en la población requiere mayor área construida tanto para vivienda como para otras obras, calles para acceder a las nuevas residenciales o nuevas áreas de recreación y centros

comerciales, balnearios, parques, entre otros. Una mayor área construida significa menor capacidad de absorción de los suelos, lo que explica la carencia de agua, a pesar de las torrenciales lluvias que se tienen en nuestro país.

Estudios sobre el balance hídrico realizados por el Servicio Nacional de Estudios Territoriales (SNET), indican que la precipitación promedio anual del país es de 1,784 mm anuales. También, determinan que del volumen anual de agua renovable (35.8 Mm<sup>3</sup>), cerca del 66% es evapotranspiración, 23%, escorrentía superficial, y 11 % infiltración en el suelo. Asimismo, se determinan que la oferta hídrica es de 34%, lo cual equivale a 12,264 Mm<sup>3</sup> anuales, es decir, 2,135 m<sup>3</sup> por persona al año. (Global Water Partnership, 2011).

Sin existir hasta la actualidad un medio para utilizar las aguas lluvias, de estas son aprovechables solo las que logran infiltrarse en nuestros suelos que luego son extraídas a través de un pozo. La capacidad de absorción de aguas lluvias en el país hasta el año 2011 era apenas del 11 %. A esto también se une la contaminación de las aguas superficiales principalmente por malas prácticas industriales y agrícolas, residuos domésticos y la ganadería, así como también por la composición de los suelos en determinadas zonas del país que pueden ser fuente de contaminación de las aguas subterráneas. Reduciendo las opciones de obtención de agua disponible para potabilizar.

Según el Ministerio del Medio Ambiente y Recursos Naturales, en un estudio realizado para verificar las aguas superficiales aptas para potabilización hasta el año 2011 solo el 17 % de los sitios muestreados cumplían para este fin. Debido a la contaminación de las fuentes superficiales de agua, se presentan serios problemas de desabastecimiento de agua potable tanto en el área rural como urbana, siendo esta una de las consecuencias del uso no sustentable de los recursos hídricos en el país.

Para diciembre del año 2013 a nivel nacional la cobertura en cuanto a conexiones para agua potable de ANDA y operadores descentralizados fue del 65.4% y del 42.0% para saneamiento (alcantarillado sanitario), lo cual indica que alrededor del 35% de la población cuenta con una conexión a través de la cual se le brinde el servicio de agua potable; pero hay que aclarar que el hecho que se tenga una conexión de agua potable no implica que se reciba un servicio ininterrumpido ya que debido a la escases de agua se raciona el servicio por áreas, por otra parte

el servicio de alcantarillado sanitario no cubre al 58% de la población, y no se aclara en ningún informe o boletín cuales son los tratamientos que se le da a estas aguas residuales o simplemente son transportadas al cauce de un río, y menos se especifica si se cuenta con un sistema de alcantarillado sanitario y alcantarillado pluvial (ANDA, 2013)

En El Salvador, el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN) realiza el monitoreo de la calidad y cantidad de agua para lo cual se realiza muestreo en 123 sitios para la realización de análisis y utilizando el Índice de Calidad del Agua (ICA) se evalúa la condición de las aguas para el desarrollo de vida acuática y los datos son alarmantes ya que de los 123 sitios muestreados el 0% presenta condiciones de agua “excelente” y apenas el 12% tiene condición de agua “buena” para el desarrollo de vida acuática, en cuanto a la evaluación de las causas y realizando el respectivo análisis con los datos obtenidos la principal causa de la contaminación en la mayoría de los sitios muestreados son las aguas residuales domésticas sin tratamiento; esto queda en evidencia debido al alto contenido de bacterias coliformes fecales encontrado, habiéndose registrado valores de hasta 3,500,000 de bacterias/100 mL; además los sitios que presentan condiciones críticas se encuentran localizadas aguas abajo de centros poblacionales y zonas de actividad industrial/comercial (MARN, 2011).

En cuanto a la calidad del agua que se recibe en muchos hogares ya sea proveniente de una cañería, pozo, ríos, comprada y que es utilizada en los hogares para consumo y labores domésticas, FUSADES realizó un estudio en el cual se detectó bacterias coliformes fecales en el 61% de los casos analizados teniendo mayor contaminación el agua proveniente de pozos y ríos, pero tomando en especial consideración los casos analizados de agua proveniente de cañería se encontró la presencia de bacterias coliformes fecales en el 43% de los casos; dicha contaminación bacteriana puede provenir de la fuente misma del agua así como de su manejo posterior; además en cuanto a la presencia de agroquímicos se encontró que entre el 0.3% y el 18.1% de los casos examinados entre ellos se pueden mencionar Lindano, Endrin, 2,4D y Atrazina y en cuanto a la presencia de metales pesados los análisis detectaron presencia de ellos en la mayoría de los casos sin importar la procedencia del agua, entre los metales pesados detectados se encuentran: Cadmio, Cromo y Plomo (Sanfeliú, 2001).

La contaminación de los recursos hídricos en el país es de tal magnitud que en las fuentes superficiales hay suficiente agua para abastecer a la población pero no puede ser utilizada para

dichos fines debido a los altos índices de contaminación y para ser potabilizada es necesario hacer uso de métodos no convencionales que requieren de una mayor inversión para su aprovechamiento.

## **1.2 DETERMINACIÓN DEL IMPACTO A LA SALUD POR LA INGESTA DE AGUA CONTAMINADA POR FLUORUROS**

En los seres humanos la absorción de flúor es a través del tracto gastrointestinal, además el flúor en el aire puede ser inhalado. Los iones de flúor son completamente absorbidos y se liberan a partir de compuestos de flúor fácilmente solubles, tal como fluoruro de sodio, fluoruro de hidrogeno, ácido fluorsilícico y monofluorofosfato de sodio.

Los compuestos de fluoruro con baja solubilidad como el fluoruro de calcio, fluoruro de magnesio y fluoruro de aluminio, no son bien absorbidos. Después de la ingesta de fluoruro de sodio en forma de comprimidos o en solución, el fluoruro se absorbe rápidamente ya que en solo unos pocos minutos después de la ingesta hay un aumento en la concentración de flúor en plasma y el pico plasmático se produce por lo general dentro de 30 minutos. La altura del pico de plasma es proporcional a la dosis de fluoruro ingerido.

El mecanismo y la velocidad de absorción gástrica de fluoruro está relacionado con la acidez gástrica, cuando el fluoruro iónico entra en contacto con el ácido del estómago se convierte en su mayoría en fluoruro de hidrogeno y la mayor parte del flúor que no se absorbe en el estómago lo hace rápidamente en el intestino (WHO, 2002)

El flúor es un elemento mineral que se encuentra sobre todo en los dientes y el esqueleto. Las trazas de flúor en los dientes ayudan a protegerlos de las caries. El flúor consumido durante la niñez se convierte en parte del esmalte dental y lo hace más resistente a los ácidos orgánicos débiles formados por los alimentos, que se adhieren o quedan atrapados entre los dientes. Este fortalecimiento reduce en gran parte la oportunidad que se produzcan caries en los dientes. Algunos estudios sugieren que el flúor puede también ayudar a fortalecer el hueso, especialmente en los últimos años de la vida, y que puede, por lo tanto, inhibir el desarrollo de la osteoporosis.

La principal fuente de flúor para la mayoría de los seres humanos es el agua que beben. Si el agua contiene aproximadamente una parte por millón de flúor (1 mg/L), entonces suministrará una adecuada cantidad de flúor para los dientes. Sin embargo, muchos suministros de agua tienen mucho menos de esta cantidad. El flúor se encuentra en el hueso; por consiguiente los pequeños pescados que se consumen enteros son una buena fuente. El té tiene un alto contenido de flúor. Otros pocos alimentos contienen gran cantidad de flúor.

Si el contenido de flúor del agua potable en cualquier localidad se encuentra por debajo de 0,5 mg/L, la caries dental será mucho más común que en los lugares donde la concentración es mayor; el nivel recomendado de flúor en el agua es entre 0,8 y 1,2 mg/L. En algunos países o localidades donde el contenido de flúor en el agua es menos de 1 mg/L, se ha convertido en práctica adicionar flúor al agua potable. Esta práctica es muy recomendada, sí se puede realizar a través de suministros de agua con grandes tuberías. En algunos países en desarrollo, donde la mayoría de las personas no tienen agua potable, no es factible. La adición de flúor a la crema dental también ayuda a reducir la caries dental. El flúor no previene totalmente la caries dental, pero puede reducir la incidencia entre 60 y 70 por ciento.

Las caries dentales no son una enfermedad carencial. Sin embargo, el ser humano es el que presenta mayor prevalencia de este cuadro clínico, que es uno de los más costosos de tratar y de prevenir. La enfermedad dental es la única entidad que el médico no está capacitado para tratar; su manejo se deja a una categoría especial de profesionales de la salud.

Se necesitan muchos nutrientes para un buen desarrollo dental y de sus estructuras vecinas. La vitamina D, el calcio y el fósforo, que son importantes en el desarrollo óseo, son también esenciales para el de los dientes. La proteína y la vitamina A son necesarias para el crecimiento de los dientes, y como se ha descrito, la vitamina C es indispensable para tener encías saludables. Sin embargo, en términos de prevenir o reducir las caries dentales, el flúor es el nutriente más importante.

En la década de 1930 se observó que las personas con acceso a agua potable que contenía una a dos partes por millón (mg/L) de flúor presentaban considerablemente menos caries dentales que aquellas cuyos suministros de agua contenían cantidades menores de flúor. Posteriormente se encontró que en las áreas donde el agua presentaba muy poco flúor, era posible reducir la

incidencia de caries dentales en un 60 a 70 por ciento si se ajustaba el nivel de flúor en el agua a aproximadamente una parte por millón.

En algunas partes del mundo, incluso ciertas áreas de la India, Kenya y Tanzania, los suministros de agua natural contienen niveles de flúor mucho mayor que los deseables. El consumo de agua con un contenido cercano a 4 mg/L dará por resultado una amplia fluorosis dental en la población. En esta condición, el diente se vuelve jaspeado y descolorido. Al principio el diente tiene parches blancos como de tiza, pero pronto se vuelve de color café con áreas decoloradas.

La fluorosis esquelética tiene consecuencias más serias y puede resultar de un prolongado consumo de agua con altos niveles de flúor de 4 a 15 mg/L. Un estudio realizado en el norte de Tanzania reveló una alta incidencia de anomalías fluoróticas en los huesos de sujetos mayores que usualmente consumían agua con altos niveles de flúor. Los exámenes radiológicos demostraron que los huesos son muy densos o escleróticos y que la calcificación anormal es común en los ligamentos intervertebrales, donde los tendones unen los músculos a los huesos y en áreas interóseas, como por ejemplo en el antebrazo. La fluorosis esquelética puede causar dolor de espalda y rigidez así como enfermedades neurológicas (Latham, 2002).

La exposición oral aguda al flúor puede producir efectos incluidos náuseas, vómitos, dolor abdominal, paro cardíaco, la muerte, efectos respiratorios; se han observado casos en informes de casos de individuos expuestos accidentalmente al ácido fluorhídrico a través del contacto dérmico que resultaron en la muerte, la dosis letal de fluoruro de sodio para un adulto promedio ha sido estimada entre 5 y 10 g (32 a 64 mg de fluoruro / Kg de peso), Geiser et al. (1994) reportó el caso de una muerte debida a la intoxicación aguda por fluoruros resultante de una inadecuada fluoración del agua potable y se estimó que el individuo consumió aproximadamente 17.9 mg de fluoruro / Kg de peso corporal antes de la muerte.

La toxicidad del flúor depende del tipo o especie que es ingerido, generalmente se trata de sales inorgánicas de flúor que son más solubles como el fluoruro de sodio que es más tóxico que los que son menos solubles como el fluoruro de calcio, los efectos gastrointestinales producidos después de la ingestión aguda de cantidades tóxicas de fluoruro probablemente surge de la acción corrosiva del ácido fluorhídrico que se produce en el entorno ácido del estómago, también se observó daño en la mucosa gástrica de voluntarios a los que se les administró fluoruro

de sodio en soluciones. Algunos individuos pueden ser hipersensibles al fluoruro de estaño manifestándose por ulceraciones en la cavidad oral después del tratamiento tópico.

La fluorosis esquelética es un estado patológico que puede sufrir por la exposición a largo plazo a niveles elevados de fluoruro, por lo que la mineralización de los huesos se retrasa o inhibe y en consecuencia los huesos pueden llegar a ser frágiles y su resistencia a las fuerzas de tracción se ven reducidas, la gravedad de los efectos asociados con la fluorosis esquelética es relativa a la cantidad de fluoruro incorporado en los huesos. En una fase pre clínica la fluorosis es asintomática, con solo un ligero aumento de la masa ósea detectado radiográficamente.

El dolor esporádico y rigidez de las articulaciones, dolor crónico en las articulaciones, osteoesclerosis del hueso esponjoso y la calcificación de los ligamentos están asociados con la primera y segunda etapas clínicas de la fluorosis esquelética. La fluorosis esquelética paralizante (fase clínica III) puede ser asociada con el movimiento limitado de las articulaciones, deformidades esqueléticas, intensa calcificación de ligamentos, pérdida de masa muscular y neurológica.

Un hallazgo consistente en los casos de incorporación de fluoruro crónicamente produce un aumento en el tiempo de retraso de la mineralización de los huesos, que puede ser demostrada por histomorfometría dinámica; al parecer en combinación con deficiencias nutricionales y el alto consumo de fluoruro y la posterior osteomalacia también puede provocar en los niños a deformidades Oseas. En paciente con osteoporosis los fluoruros pueden estimular la formación ósea hasta tal punto que a pesar de la administración de suplementos de calcio se produce deficiencia de calcio, hiperparatiroidismo secundario y osteomalacia, además las personas con diabetes e insuficiencia renal son más propensos a desarrollar efectos toxicológicos relacionados con fluoruros, esto debido a su disminución de la excreción de fluoruro.

Un gran número de personas que residen en la India y China padecen de fluorosis esquelética, que en algunos casos se encuentran gravemente incapacitados, además de estar expuestos a una mayor ingesta de fluoruros de alimentos y agua de bebida con altos niveles de flúor, otros factores como el estaño nutricional, el clima y otros factores pueden influir en el desarrollo de fluorosis esquelética endémica, estos problemas hacen que sea difícil caracterizar la relación dosis- respuesta en los estudios de fluorosis esquelética. (WHO, 2002)

### 1.3 DETERMINACIÓN DE POSIBLES FUENTES DE CONTAMINACIÓN DE FLÚOR EN EL AGUA DEL POZO DEL CASERÍO ESCAMIL

El municipio de Agua Caliente pertenece al departamento de Chalatenango, está limitado al norte por La Palma y Metapán (Santa Ana), al noreste, este y sureste por La Reina, al sur por El Paisnal (San Salvador), al sureste, este y noreste por Nueva Concepción.

El área del municipio es de 195.74 Km<sup>2</sup>, riegan al municipio los ríos San Pablo, Talquezalapa, Metayate y Zapoapa, los cerros más notables son El Zapatoro o Gallinero, Las Piletas, Las Lajas Negras, Apersogado y Tierra Sumida. Su clima es cálido y cuenta con una población aproximada de 8,915 habitantes.

Posee un área rural aproximada de 195.61 kilómetros cuadrados y la urbana de solo 0.13 Km<sup>2</sup>. Se divide en los siguientes cantones y caseríos:

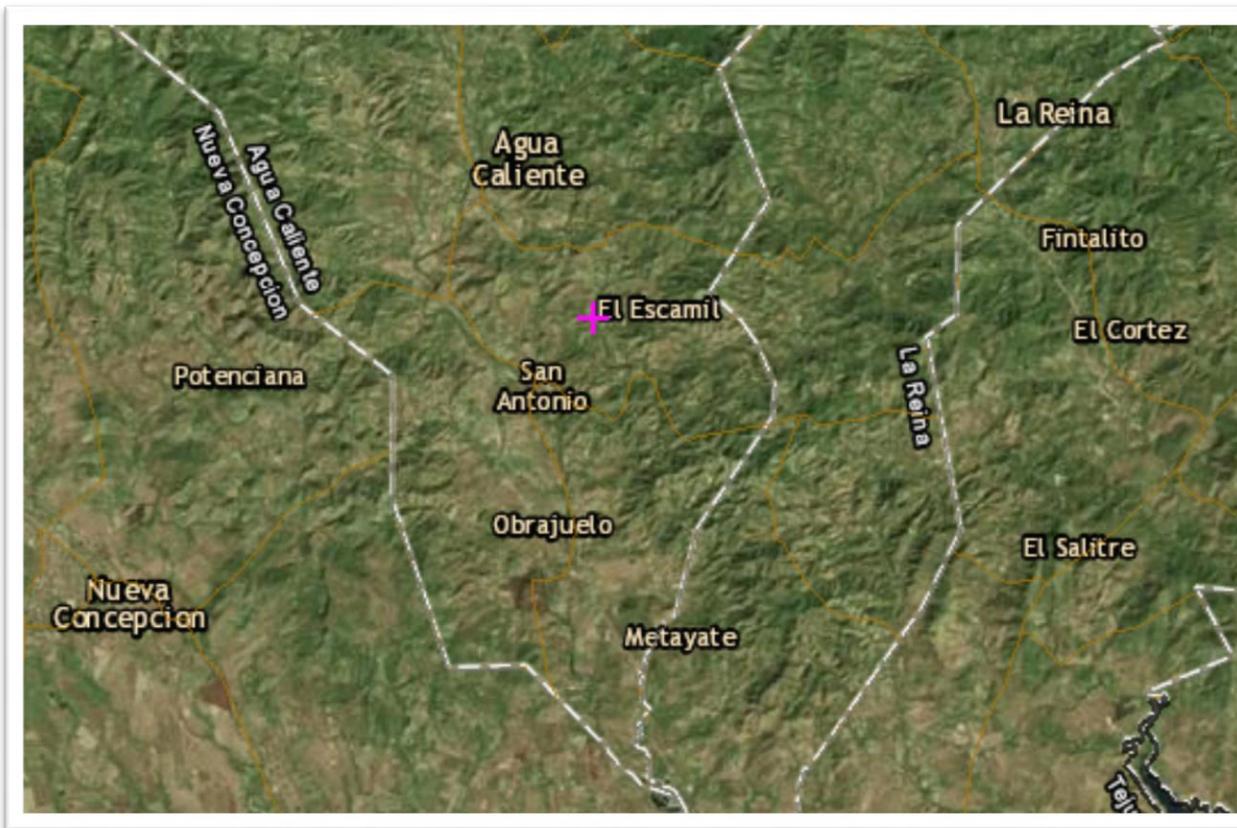
- Santa Rosa (Santa Rosa, Escamil, Junta, Los Nances, Los Naranjos y El Morrito)
- Agua Fría (Agua Fría, El Rosario, Motañita y Achiote)
- Ojos de Agua (Ojos de Agua, Conacaste, Montañita, Pozos y Potrerillos)
- Agua Zarca (Agua Zarca, San Antonio y El Jute)
- Obrajuelo (Obrajuelo, Jicarón y Poza Redonda)
- Cerro Grande (Cerro Grande, Casa de Teja, El Chunte, El Jute, Sigumper, La Puente, Quebracho, Los Cañales, Portezuelo, Quebrada de Agua, Piñuelas y Pitarrillo) y
- Encumbrado (Encumbrado, Mal Paso, Jocotillo, Quesera, Santa Catarina, San Pablo, Flor Amarilla, Carrizal y Copinol).

En la zona urbana poseen agua potable, en la zona rural se abastecen de pozos (donde se llevara el estudio) o de afluentes naturales, a los que su gente visita para poder hacer uso de este vital líquido (Fundación Nacional para el Desarrollo, 2000).

El caserío Escamil está ubicado en el cantón Santa Rosa en el Municipio de Agua Caliente, como se muestra en la figura 1.1. , en él se encuentran registrados 210 habitantes. Entre ellos 90 hombres, 85 mujeres, 20 niños y un total de 21 niñas.

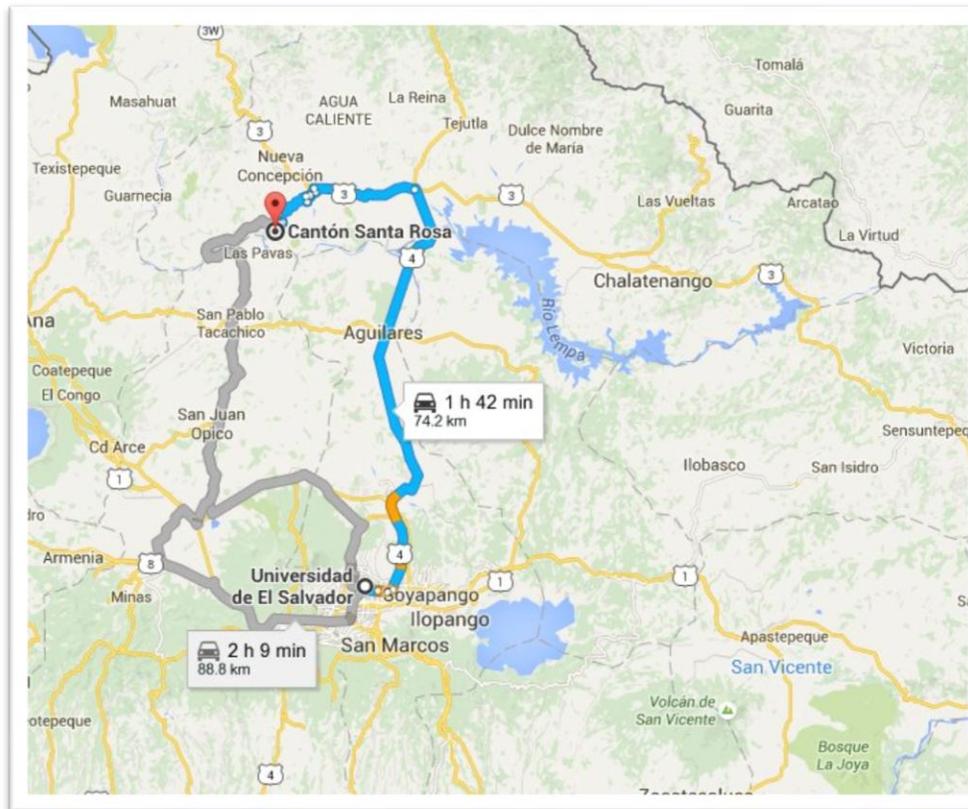
Para llegar al Caserío Escamil, en Agua Caliente desde San Salvador, se debe viajar en la Carretera Troncal del Norte y al llegar al desvío de Amayo, tomar la carretera hacia Nueva Concepción (a la izquierda), a poca distancia se encuentra la calle que conduce a esta ciudad, hacia la derecha. Luego se debe conducir por una calle empedrada siguiendola hasta llegar a la ciudad de Agua Caliente, donde se puede observar la Iglesia Parroquial y la Alcaldía, al pasar unas calles se encuentra la Unidad de Salud. Se debe salir de la ciudad por una calle pedregosa unos 5 Km adelante hasta poder ver la Escuela del Caserío Escamil el cual se encuentra a unos 20 metros del pozo de estudio, la ruta está señalada en la figura 1.2.

La principal actividad económica del caserío Escamil es la ganadería. Siendo su principal actividad la producción de leche, la cual venden a empresas dedicadas a la elaboración de productos lácteos y para el programa “vaso de leche escolar” del gobierno; así también utiliza la leche para la elaboración de sus derivados.



<p>Trabajo de Graduación:  <b>“PROPUESTA DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO PARA DISMINUIR FLUORUROS DEL AGUA DEL POZO DE CASERÍO ESCAMIL, CANTÓN SANTA ROSA, AGUA CALIENTE, CHALATENANGO”</b></p>	<p>Elaborado por:          Benítez Cañas, Julio José          Pacheco González, Luis Eduardo          Sandoval Blanco, Carlos Adalberto</p>	<p>Municipio de Agua caliente, cantón Santa Rosa, caserío Escamil          Fecha:          09 de abril de 2016</p>
--	---	--

Figura 1.1. Mapa de relieve que muestra el caserío Escamil y sus alrededores (elaboración propia).



<p>Trabajo de Graduación:  <b>“PROPUESTA DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO PARA DISMINUIR FLUORUROS DEL AGUA DEL POZO DE CASERÍO ESCAMIL, CANTÓN SANTA ROSA, AGUA CALIENTE, CHALATENANGO”</b></p>	<p>Elaborado por:          Benítez Cañas, Julio José          Pacheco González, Luis Eduardo          Sandoval Blanco, Carlos Adalberto</p>	<p>Municipio de Agua caliente,          cantón Santa Rosa, caserío          Escamil          Fecha:          09 de abril de 2016</p>
--	---	--

Figura 1.2. Croquis de ubicación del caserío Escamil (Elaboración propia).

### 1.3.1 Tipo de suelo de la zona de estudio

Utilizando las coordenadas geodésicas de latitud: 14.167397 y longitud de:-89.20909 de la ubicación del pozo de caserío Escamil en la herramienta virtual VIGEA (Visualizador de Información Geográfica de Evaluación Ambiental) se obtuvo que para la ubicación geográfica del lugar se tiene el tipo de suelo Grumosoles y para el área geográfica que corresponde al cantón Santa Rosa se cuentan con los tipos de suelo grumosoles y litosoles así como se observa en la figura 1.3

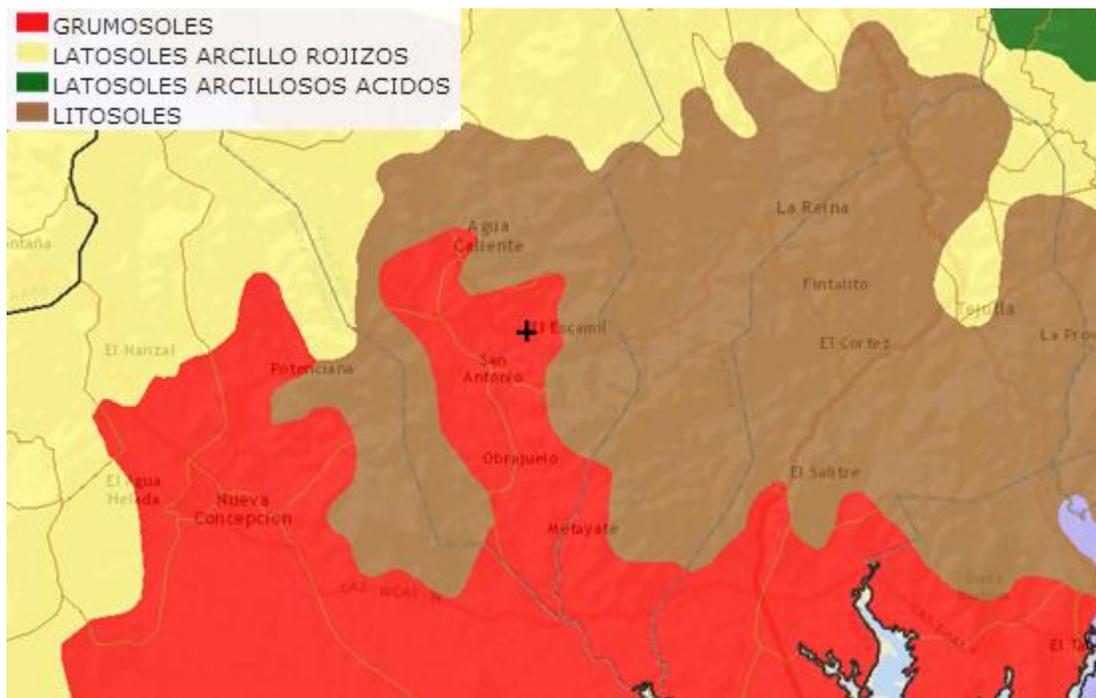


Figura 1.3. Tipo de suelo del caserío Escamil y sus alrededores (elaboración propia).

Existen diversos sistemas de clasificación de suelos. La acción conjunta de los factores que condicionan la formación y evolución del suelo conduce al desarrollo de diferentes perfiles o tipos de suelos. La clasificación de los mismos puede basarse en diferentes criterios. Entre otros, se puede mencionar:

- Características intrínsecas del suelo, dependientes de los procesos genéticos que los desarrollan.
- Propiedades del suelo como permeabilidad, salinidad, composición y que se relacionan estrechamente con los factores de formación.

- Según su aptitud para diferentes usos, fundamentalmente agrícola.

Dentro de los tipos de suelos presentes en El Salvador se mencionan los siguientes, encontrados en la zona de estudio utilizando la herramienta VIGEA:

- Grumosoles:

Suelos muy arcillosos de color gris a negro con vegetación de morros, cuando están muy mojados son muy pegajosos y muy plásticos. Cuando están secos son muy duros y se rajan. En la superficie son de color oscuro pero con poco humus o materia orgánica. El subsuelo es gris oscuro. Son muy profundos poco permeables por lo que la infiltración de agua lluvia es muy lenta. Su uso potencial es de moderada a baja, no apta para cultivos permanentes de alto valor comercial porque al rajarse rompen las raíces de las plantas (MAG, 2002).

- Litosoles:

Suelos de muy poca profundidad sobre roca pura, son suelos muy complejos. La mayoría son suelos cuyos horizontes superficiales han sido truncados a causa de una severa erosión laminar o sea que la erosión ocurre en láminas y no en forma de cárcavas, son suelos arcillosos como los latosoles pero muy superficiales. Las texturas varían de gruesa, arenas y gravas hasta muy pedregosos sobre la roca dura. El uso potencial es muy pobre de bajo rendimiento. Sin embargo en algunos lugares muy pedregosos por la gran cantidad de piedras reduce la erosión, por lo cual pudieran generar buenos rendimientos por mata si el cultivo se hace con chuzo (MAG, 2002).

Al efectuar las visitas de campo a las zonas circundantes al pozo y al tanque de abastecimiento tal como se observa en la figura 1.4 en los alrededores a estos sitios no se encuentran fábricas de ningún tipo, en la zona la actividad agrícola es escasa, no así la actividad ganadera, el paisaje es árido y con presencia de muchas rocas, además todo la zona se encuentra rodeada por pequeños cerros de escasa vegetación así como se observa en la figura 1.5, de acuerdo a lo observado en el lugar las características del suelo donde se encuentra el pozo corresponde al tipo de los Grumosoles y las áreas de terreno circundante corresponden al tipo de los Litosoles correspondiendo con las descripciones antes plasmadas.



Figura 1.4. Vista panorámica de los alrededores de la zona de estudio



Figura 1.5. Alrededores del taque de almacenamiento

### 1.3.2 Posibles fuentes de contaminación

Los fluoruros son definidos como compuestos binarios o sales de flúor y otro elemento. Algunos ejemplos de fluoruros son el fluoruro de sodio y el fluoruro de calcio. Ambos son sólidos blancos. El fluoruro de sodio se disuelve fácilmente en agua, pero no así el fluoruro de calcio. El fluoruro de sodio se añade a menudo a los suministros de agua potable y a una variedad de productos dentales, como por ejemplo pastas dentales y enjuagues dentales, para prevenir caries dentales. Otros fluoruros que se usan comúnmente para fluorar el agua son el ácido fluorosilícico y el fluorosilicato de sodio. El fluoruro de hidrógeno y el flúor son sustancias químicamente relacionadas. El flúor es un gas natural de color amarillo pálido a verde de olor penetrante. El flúor también se combina con hidrógeno para producir fluoruro de hidrógeno, un gas incoloro. El fluoruro de hidrógeno se disuelve en agua formando ácido fluorhídrico.

#### Flúor y sus derivados en el medio ambiente

- El flúor no puede ser destruido en el ambiente; solamente puede cambiar de forma. El flúor forma sales con minerales en el suelo.
- El gas fluoruro de hidrógeno será absorbido por la lluvia, las nubes y la niebla y formará ácido fluorhídrico, el que caerá a la tierra.
- Los fluoruros liberados al aire por volcanes y la industria son transportados por el viento y la lluvia a aguas, suelo y fuentes de alimentos cercanas.
- En el agua y en el suelo los fluoruros se adherirán fuertemente al sedimento o a partículas en el suelo.
- Los fluoruros se acumulan en plantas y en animales. En animales, el fluoruro se acumula principalmente en los huesos o en la caparazón, más bien que en tejidos blandos.

#### Fuentes y usos

Dada su alta reactividad, el flúor raramente se encuentra en la naturaleza en su forma elemental, se lo halla tanto en su forma iónica como en sus formas orgánicas e inorgánicas. Los principales compuestos fluorados en la naturaleza son el espatofluor (fluoruro de calcio) y la criolita (fluoruro de aluminio y fluoruro de sodio).

Las piedras, los suelos, el agua, el aire, las plantas y los animales contienen flúor en concentraciones variables. La importancia para el ser humano varía dependiendo del grado de exposición y de la naturaleza de la misma: natural, médica o contaminación ambiental.

La exposición de los seres humanos se halla relacionada con la presencia de los compuestos en la naturaleza, agua, vegetales, peces, en los ámbitos laborales, de los contaminantes industriales provenientes de hulla, de la manufactura de aluminio, plomo, cobre y níquel, industrias del acero, opacar cristal y esmaltes, producción de ácido Fluorhídrico, catalizadores de reacciones orgánicas. También se lo puede encontrar en algunos plaguicidas (uso de criolita y fluoruro de sodio como raticidas) y en la fabricación de abono.

En medicina desde hace años se lo preconiza como preventivo de las caries dentales en la infancia, en niños cuya agua de bebida tenga contenidos de flúor en valores inferiores de 0,5 mg/L (OMS). Se prescribe, además en forma de fluoruro de sodio, cuyas dosis varían en función de la edad y peso del paciente.

Se lo comercializa en forma de gotas, comprimidos. 2,2 mg de fluoruro de sodio equivalen a 1 mg de flúor elemental. Otra utilización médica (actualmente en desuso) fue para el tratamiento de la osteoporosis.

### **1.3.2.1 Fuentes naturales de contaminación**

Los fluoruros son liberados en el medio ambiente de forma natural por el desgaste de minerales, las emisiones de los volcanes y aerosoles en ambientes marinos. Las estimaciones del lanzamiento anual mundial de fluoruro de hidrógeno a partir de fuentes volcánicas a través de la desgasificación pasiva y erupciones van desde 60 a 6000 kilotoneladas de los cuales aproximadamente el 10% puede ser introducido directamente en la estratosfera. Cada año, aproximadamente 20 kilotoneladas de fluoruro pueden ser liberados en aerosoles marinos.

La principal fuente natural de fluoruros inorgánicos en el suelo son las rocas. Algunos minerales de flúor por ejemplo, criolita ( $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ ) se descompone rápidamente en la intemperie y especialmente en condiciones ácidas. Otros minerales como fluorapatita ( $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$ ) y fluoruro de calcio, se disuelven más lentamente. El mineral fluorflogopita (mica,  $(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})\text{F}_2$ ) es estable en suelos alcalinos y calcáreos sin embargo su solubilidad se ve afectada por el pH y

las actividades de ácido silícico ( $\text{H}_4\text{SiO}_4$ ) y iones de aluminio ( $\text{Al}^{3+}$ ), potasio ( $\text{K}^+$ ) y magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ).

### 1.3.2.2 Las fuentes antropogénicas de contaminación

#### ➤ Producción y uso de fluoruro de hidrógeno:

El fluoruro de hidrógeno (ácido fluorhídrico) es un importante compuesto industrial con un consumo mundial anual estimado en más de un millón de toneladas. El fluoruro de hidrógeno es fabricado a partir de fluoruro de calcio y se utiliza principalmente en la producción de criolita sintética, fluoruro de aluminio ( $\text{AlF}_3$ ), alquilatos para motor de gasolina y los clorofluorocarbonos; sin embargo la demanda de clorofluorocarbonos está disminuyendo como resultado de los esfuerzos para restringir su uso.

El fluoruro de hidrógeno también se utiliza en la síntesis de tetrafluoruro de uranio ( $\text{UF}_4$ ) y hexafluoruro de uranio ( $\text{UF}_6$ ), de los cuales ambos se utilizan en la industria nuclear. También se utiliza en el grabado de dispositivos semiconductores, la limpieza y el grabado de vidrio, limpieza de ladrillos y aluminio y el curtido del cuero, así como en los procesos de fabricación petroquímicos. El fluoruro de hidrógeno también se puede encontrar en forma comercial en removedores de óxido.

#### ➤ Fluoruro de calcio:

Industrialmente el fluoruro de calcio contiene principalmente fluoruro mineral, los datos de producción identificados se limitan a los EE.UU., donde el promedio anual de producción de fluoruro de calcio fue estimado entre 118,000 y 225,000 toneladas durante el periodo de 1972-1978. El consumo de fluoruro de calcio (como fluorita) en Canadá en 1989 se estimó en 180,000 toneladas y en 1977 el consumo de fluoruro de calcio estimado en los EE.UU. fue de 1,063,000 toneladas.

El fluoruro de calcio es utilizado como fundente en el acero, la producción de vidrio y el esmalte y como la materia prima para la producción de ácido fluorhídrico anhidro y fluoruro de hidrógeno. El fluoruro de calcio también se utiliza como un electrólito fundido para la separación de oxígeno y de alúmina en la producción de aluminio.

➤ Fluoruro de sodio:

Los datos concernientes al consumo anual total o producción de fluoruro de sodio en todo el mundo no han sido identificados. El fluoruro de sodio es generalmente preparado a partir de ácido fluorhídrico y carbonato de sodio o hidróxido de sodio; se utiliza en la fluoración controlada del agua potable, como conservante en ciertas colas, en la producción de vidrio y esmalte, como fundente en la producción de acero y aluminio, como insecticida y como un conservante de la madera.

➤ Ácido fluorosilícico

El ácido fluorosilícico es una solución acuosa que es comúnmente fabricado como un coproducto de la fabricación de fertilizantes fosfatados. Se utiliza ampliamente para la fluoración del agua potable y mediante hidrólisis se liberan iones fluoruro. Cuando se utiliza para la fluoración del agua potable para consumo humano el ácido fluorosilícico debe cumplir con las normas apropiadas, tales como las publicadas por el American Water Works Asociación y el Comité Europeo de Normalización u otros regímenes aprobados para los productos químicos aptos para agua potable.

➤ Hexafluorosilicato de sodio:

El hexafluorosilicato de sodio, como el ácido fluosilícico, se utiliza en la fluoración del agua potable. Normalmente se disuelve completamente en agua antes de la dosificación, donde se hidroliza para dar iones fluoruro. Cuando se utiliza para la fluoración del agua potable, también debe cumplir con las respectivas normas de pureza de los productos químicos para el agua potable.

➤ Hexafluoruro de azufre:

Más de 110 toneladas de hexafluoruro de azufre se importan en Canadá cada año. Esta sustancia es utilizada ampliamente como aislamiento y medio de interrupción de la corriente en aparatos de conexión eléctrica, tales como interruptores de potencia, en diversos componentes en las subestaciones eléctricas y como gas inerte protector sobre metales fundidos, tales como magnesio y aluminio. Más del 90% de la cantidad total de hexafluoruro de azufre importado en

Canadá se utiliza en la producción de magnesio; el resto se utiliza en equipos de conmutación eléctrica.

➤ Fluoropatita

La fluoropatita, es un importante contenedor mineral de calcio y fluoruro, se utiliza como fuente de fosfatos en la industria de fertilizantes.

➤ Fertilizantes fosfatados

Los fertilizantes de fosfato son la principal fuente de contaminación de fluoruro de los suelos agrícolas. Se fabrican a partir de fosfatos de rocas, que generalmente contienen alrededor de 3,5% de flúor. Sin embargo, durante la fabricación de fertilizantes de fosfato, parte de los fluoruros se pierde en la atmósfera durante el proceso de acidulación, y la concentración de fluoruros en el abono final se baja más a través de la dilución con azufre (superfosfato y ion amonio (fosfatos amoniacales); el producto final contiene comúnmente entre 1.3 y 3.0% de flúor. En Australia, se ha estimado que la adición anual promedio de fluoruros al suelo a través de la fertilización es de 1,1 kg / ha.

➤ Emisiones

La información cuantitativa disponible sobre la liberación de fluoruro en el medio ambiente (aire, agua y suelo) de fuentes industriales es limitada. Los fluoruros se liberan al medio ambiente a través de escape de humos, aguas de proceso y residuales procedentes de diversos procesos industriales, incluyendo la fabricación de acero, aluminio primario, cobre y la producción de níquel, la producción y el uso de fertilizantes de fosfato, vidrio, ladrillo y cerámica, y la producción del pegamento adhesivo. El uso de pesticidas que contienen fluoruro, así como la fluoración de los suministros de agua potable también contribuye a la liberación de fluoruros de fuentes antropogénicas.

La cantidad total anual de fluoruros liberada al medio ambiente de origen industrial se estimó en más de 23,500 toneladas en Canadá y 46,600 toneladas en los Países Bajos. La contribución relativa de las diversas fuentes antropogénicas a las emisiones totales de fluoruro al aire, agua y suelos en Canadá se estima en un 48% para la producción de fertilizantes de fosfato, 20% de la

producción química, el 19% de la producción de aluminio, 8% para acero y producción de petróleo y 5% para el carbón de leña, como se muestra en la figura 1.6. En los Países Bajos, el 93% de las emisiones totales de fluoruros en aire, agua y suelo se derivan de la producción y el uso de mineral de fosfato, con cantidades más pequeñas se emiten por el procesamiento de minerales 2%, la industria del metal 4% y "otras industria" 1%, como se muestra en la figura 1.7. El total de fluoruros de hidrógeno liberados al aire, aguas superficiales, inyección subterránea y suelo en los EE.UU. durante el año 1999 fue de 33000, 7.7, 1800 y 64 toneladas, respectivamente como se muestra en la figura 1.8. Las cantidades totales de flúor que liberan al aire, las aguas superficiales y las tierras, estas tres naciones, fueron 39, 24 y 500 toneladas, respectivamente (Vázquez Alvarado, Hernández Ceruelos, y Muñoz Juárez, 2016).

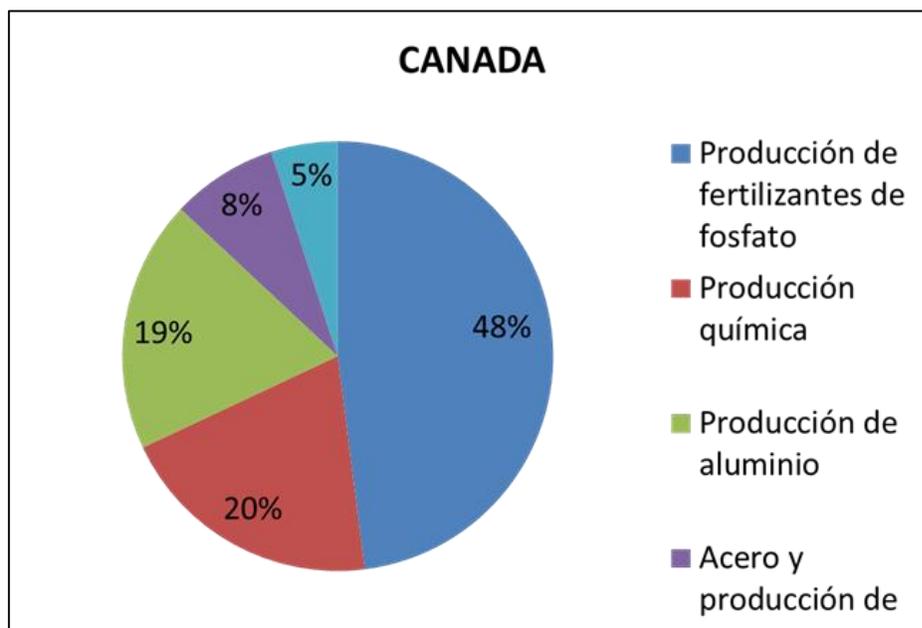


Figura 1.6 Cantidad total anual de fluoruros liberada al medio ambiente de origen industrial en Canadá (elaboración propia, a partir de datos de Vázquez Alvarado, Hernández Ceruelos, y Muñoz Juárez, 2016)

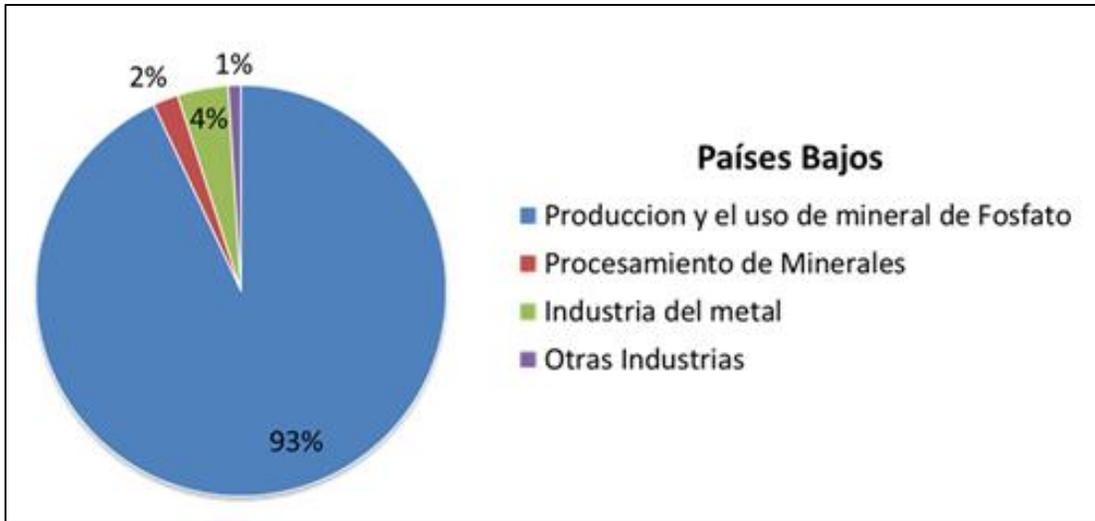


Figura 1.7 Cantidad total anual de fluoruros liberada al medio ambiente de origen industrial en los países bajos (elaboración propia, a partir de datos de Vázquez Alvarado, Hernández Ceruelos, y Muñoz Juárez, 2016).

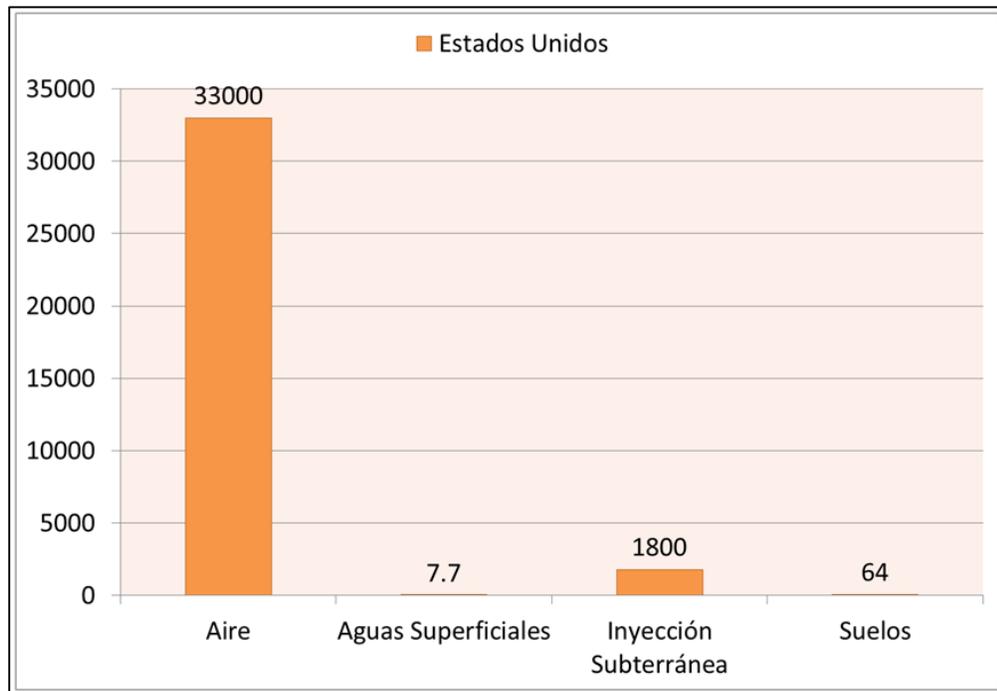


Figura 1.8 Cantidad total anual de fluoruros liberada al medio ambiente de origen industrial en los Estados Unidos (elaboración propia, a partir de datos de Vázquez Alvarado, Hernández Ceruelos, y Muñoz Juárez, 2016).

En la figura 1.9 se comparan los 3 sectores, y se muestran las cantidades totales (%) distribuidas.

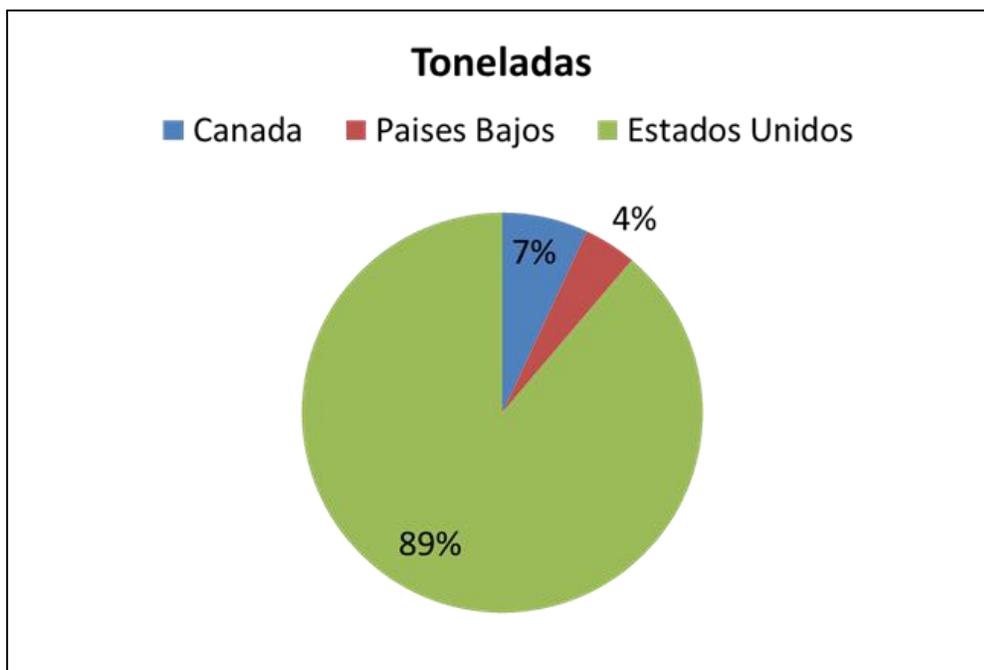


Figura 1.9 Cantidad total anual de fluoruros liberada al medio ambiente de origen industrial de todos los sectores (elaboración propia, a partir de datos de Vázquez Alvarado, Hernández Ceruelos, y Muñoz Juárez, 2016).

### 1.3.3 Posibles fuentes de contaminación de flúor en el agua del pozo del caserío Escamil

El flúor es un elemento que se ha reconocido en casi todas las aguas minerales y en las potables, que tiene variado origen.

En su origen primario se encuentra en los magmas, de los que pasa a los minerales de las rocas eruptivas y a los volátiles residuales de la diferenciación y cristalización magmática; de todos los minerales de cloro, flúor, bromo y yodo, el cloro y flúor son lo más abundantes; después, sigue el bromo, y el de menor proporción es el yodo. Además, se encuentran los cuatro en las emanaciones volcánicas. Todos son litófilos y biófilos.

El flúor está en las micas, anfíboles, turmalinas, etc. Como minerales independientes hay varias especies fluoruradas, pero la más común es fluorina, fluoruro cálcico y después criolita, fluoruro aluminico sódico. Por la alteración de estos minerales y el ataque por aguas sobrecalentadas y a

la alta presión, se moviliza el flúor y pasa a las aguas superficiales en el primer caso y a las termales en el segundo. Las formaciones graníticas y néisicas son ricas en minerales que llevan flúor, sea como especies propias o sea disperso en silicatos, oculto en la red atómica de estos. Por ello en las aguas minerales de estas regiones es constante su presencia (Real Academia Nacional de Medicina, 1956).

El municipio de Agua Caliente, en el cual se encuentra ubicado el caserío Escamil, recibe su nombre por la presencia de aguas termales a lo largo de su extensión territorial. Se puede atribuir que la presencia de fluoruros en el agua del pozo de caserío Escamil es debido a la presencia de estas aguas termales, que por su calentamiento y alta presión movilizan el flúor que pasa a las aguas subterráneas, que por su cercanía con el caserío, afectan también las aguas del pozo.

## **CAPÍTULO 2. MÉTODOS DE REDUCCIÓN DE FLUORUROS EN AGUAS PARA CONSUMO HUMANO PROVENIENTE DE POZOS**

Teniendo presente los problemas asociados a la ingesta de altos contenidos de fluoruros a través de diferentes fuentes, principalmente el agua de consumo se vuelve necesario estudiar métodos que reduzcan las concentraciones de estos compuestos.

Existen actualmente en el mercado diferentes procesos tecnológicos para la eliminación parcial de flúor, sin embargo se están ensayando otros métodos alternativos, entre los cuales se encuentran coagulación con aluminio, alúmina activada, osmosis inversa, o como los que utilizan hueso molido el cual se estudiará en este trabajo.

El método del hueso bovino molido ya sea carbonizado o solamente pulverizado es uno de los métodos más económicos y a la vez más efectivos, lo cual puede resultar muy beneficioso a este sector de la población que no cuenta con la disposición de recurrir a métodos que requieren más capital para su obtención.

### **2.1 REDUCCIÓN DE FLUORUROS CON HUESO BOVINO PULVERIZADO**

Existen varios métodos para la eliminación de fluoruro, como precipitación, adsorción, intercambio iónico y procesos de membrana como; osmosis inversa, nanofiltración,

electrodialisis y la técnica de Nalgonda que se basan en la adición de un álcali, cloruro, sulfato de aluminio o cloruro de aluminio o ambos.

El problema más común de exceso de fluoruros en el agua potable ocurre en aguas subterráneas, cuando estas son usadas como fuentes de abastecimiento de agua potable.

### **2.1.1 Hueso bovino pulverizado**

Para este caso, el método más recomendable es el intercambio iónico, para lo cual son usados lechos de contacto a presión o por gravedad, usándose como medios de contacto el carbón de hueso molido y la bauxita activada. La selección de uno de estos materiales depende de su costo de adquisición local, siendo más barato el primero cuando este es producido localmente.

El hueso molido (al que se le elimino toda sustancia orgánica) es esencialmente una apatita hidroxilada, remueve el fluoruro del agua por medio de un intercambio de iones hidróxilo por iones fluoruro (Cordero, 2009).

Las leyes de acción de la masa se aplican a la eficiencia de remoción del fluoruro y por lo tanto, cuanto más alta la concentración inicial, mayor es el porcentaje de remoción de  $F^-$

En diversas partes del mundo, es frecuente encontrar grandes zonas con aguas subterráneas que pueden aparecer con cantidades elevadas de fluoruro, y estas aguas generalmente son explotadas para satisfacer las necesidades de consumo humano y representan un riesgo para la salud al ser ingeridas por largos periodos resultan tóxicas. Esto es debido a que el fluoruro es un elemento indispensable para la salud dental de la población, pero en altas concentraciones provoca fluorosis.

La utilización del hueso molido permite la separación del flúor por principio de intercambio iónico. El hueso molido es un elemento con capacidad para retener el ión  $F^-$  <sup>(1,2)</sup> contenido en aguas naturales. La materia inorgánica del hueso está constituida principalmente por cristales submicroscópicos de Hidroxiapatita (HaP), de fórmula general  $Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$ , depositada en forma de agujas delgadas. Los principales iones en el tejido óseo son  $Ca^{+2}$ ,  $Mg^{+2}$ ,  $Na^{+1}$ ,  $Fe^{+3}$ ,  $CO_3^{-2}$ ,  $PO_4^{-3}$ ,  $OH^{-1}$ .

En una solución de fluoruro, los iones fluoruro son primeramente adsorbidos en la superficie de hidroxiapatita y el fluoruro adsorbido es intercambiado con el grupo superficial OH<sup>-</sup> más cercano de la partícula de apatita y luego intercambiado con el grupo móvil de OH dentro de las partículas de hidroxiapatita, resultando una muy alta absorción de fluoruro en hidroxiapatita.

#### **2.1.1.1 Tratamiento con soda cáustica:**

Se aconseja desengrasar de la siguiente manera, cubrir el hueso con soda cáustica 6 Molar en un rango del 20% al 30% del volumen del hueso y calentar a temperatura no mayor de 50° C, dejar remover la grasa durante 30 minutos. Volcar la soda dejando escurrir bien, volver a cubrir con solución de soda manteniendo la temperatura en los 50° C, volcar, lavar y neutralizar con ácido clorhídrico diluido. Si aún permanece demasiado alto el contenido de grasa, repetir la operación hasta alcanzar condiciones apropiadas. Temperaturas mayores a 50° C y concentraciones de solución de soda caustica mayores 6 Molar originan el ablandamiento del hueso que se deforma y pulveriza. Este tratamiento además de requerir un volumen grande de soda origina una fuerte pérdida de material del orden del 70%. Aun así queda un resto de materia orgánica que puesto en planta origina sobre todo en paradas o funcionamiento intermitente olores y sabores desagradables que se transmiten al agua de consumo.

#### **2.1.2 Experiencias en la reducción de fluoruros con hueso pulverizado en Sonora**

En Sonora ubicado en el Noroeste de México, las concentraciones detectadas en el agua subterránea, de consumo humano varían desde 0,1 hasta 7,8 mg/l. En la Ciudad de Hermosillo capital del Estado de Sonora, los pozos que abastecen la parte norte presentan la más altas concentraciones de fluoruro. Esta ciudad, ha presentado un aumento en la demanda de agua dada la tasa de crecimiento media anual de 3,13 %. La población ascendió a 711.512 habitantes, siendo la ciudad más poblada del Estado. El abasto de agua es por dos fuentes: de origen superficial, a través, de los ríos Sonora y San Miguel cuyos escurrimientos son almacenados en la Presa Abelardo L. Rodríguez y la de origen subterráneo obtenido de la red de pozos ubicados al Norte y Noreste de la ciudad.

Un método para reducir la concentración de fluoruro es mezclar con aguas de pozos de más bajas concentraciones, sin embargo en la mayoría de los casos no se alcanza los niveles máximos permitidos por la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSAI-1994. Por lo tanto, es necesario aplicar métodos adicionales de eliminación de fluoruro que permitan lograr los límites apropiados de consumo.

Para la realización de este trabajo se utilizó la información de la empresa municipal encargada del suministro de agua potable de la ciudad denominada Agua de Hermosillo. In situ se cuantificó el pH, la temperatura, conductividad eléctrica y en laboratorio se determinaron los iones mayoritarios y el fluoruro.

#### Preparación del hueso pulverizado.

La preparación del hueso granular consistió en hervir el hueso hasta dejarlo limpio de grasa, enseguida se dejó secar a temperatura ambiente para posteriormente triturarlo y pasarlo por malla de 60 unidades (0.25 mm). Los ensayos se realizaron en agua desionizada y agua de pozos de la “Captación Victoria”, Se seleccionaron pozos con concentraciones entre de 2 a 9 mg/l. Para obtener concentraciones similares al agua de las muestras de pozos se le agregó fluoruro de sodio al agua desionizada. Para definir el equilibrio usando hueso granular se trabajó con una concentración de 20 g/l. La solución y el sorbente se mantuvieron en agitación continua (60 rpm) y a temperatura de 25°C para tiempos comprendidos de 5 hasta 2880 min (48 h). Al terminar cada periodo de tiempo se muestreo y se determinó la concentración de fluoruro presente. Se consideró que se alcanzaba el equilibrio cuando la concentración de fluoruro obtenida era la misma o bien que hubiera una diferencia del 5% con respecto muestra del período de tiempo anterior.

Para conocer la capacidad de absorción del hueso granular se realizaron diferentes ensayos, tanto en agua desionizada como en agua de los pozos de “Captación Victoria”. La concentración del fluoruro residual bajo diferentes intervalos de tiempo de contacto es mostrada en la figura siguiente:

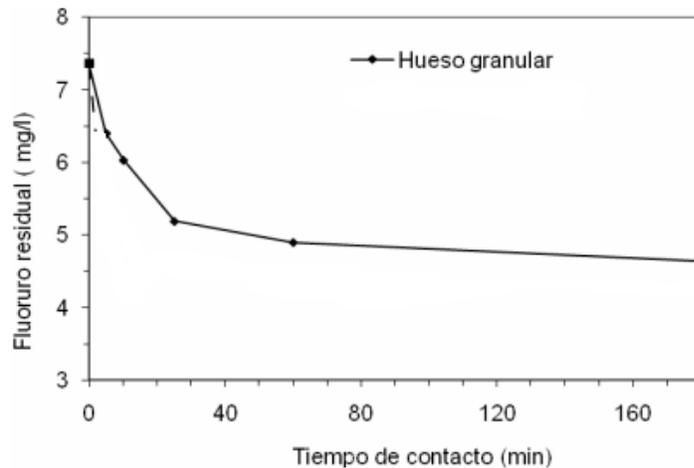


Figura 2.1. Concentración del fluoruro residual bajo diferentes intervalos de tiempo de contacto (Valenzuela, Ramírez Hernández, Sol, y Reyes, *Alternativas para la Eliminación Doméstica de Fluor en agua de consumo humano*, 2010)

En 5 minutos de tiempo de contacto con hueso granular se obtuvo una remoción de 0,96 mgF/l que representa un 13% de fluoruro removido. Con hueso granular el fluoruro fue removido en un 18% (1,33mg/l), con 10 minutos de tiempo de contacto, es posible remover hasta un 37% después de 180 minutos, de tiempo sin embargo no es posible alcanzar el equilibrio para tales tiempos.

El proceso de remoción de fluoruro con hueso granular muestra tanto ventajas como desventajas; entre las ventajas tenemos que, presenta una reducción de fluoruros que es en esencia lo que se busca, la obtención del material es de bajo costo para poblados con escasos recursos económicos lo cual es un beneficio para la población afectada. Entre las desventajas que se pudieron verificar en la experiencia en Sonora, México se encontraron tres inconvenientes; primero, se alcanza a remover el 33% de fluoruro en una hora de tiempo de contacto, lo que lo hace un proceso lento; segundo, el agua tratada presenta un color y olor bastante desagradable que no es fácil de eliminar, y; tercero el incremento en la concentración de algunos compuestos como calcio, bicarbonato, carbonato y magnesio, así como el aumento en la alcalinidad la CE y en algunos casos el pH (Valenzuela, Ramírez Hernández, Sol, y Reyes, *Alternativas para la Eliminación Doméstica de Fluor en agua de consumo humano*, 2010).

## 2.2 REDUCCIÓN DE FLUORUROS CON HUESO BOVINO PULVERIZADO Y CALCINADO

La calcinación es el proceso químico que tiene lugar mediante calentamiento a altas temperaturas y cuya finalidad es la eliminación de los componentes volátiles presentes en una sustancia sólida, en el caso del hueso bovino, se busca eliminar la grasa presente en éste para evitar la contaminación del agua a tratar.

### 2.2.1 Hueso calcinado

La utilización de hueso como método de desfluorización fue desarrollado en Dinamarca y consiste en mezclar fosfato de sodio dihidrogenado hidratado ( $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) y cloruro de calcio ( $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) en una columna de agua. La mezcla obtenida forma un lecho de contacto con el hueso calcinado que permite un flujo lento del agua con fluoruro a través de la columna, eliminando el 97.9 % de fluoruro en un agua que contenía 11 mg/l con un tiempo de retención de una hora (Valenzuela, Ramírez Hernández, Sol, y Reyes, Alternativas para la Eliminación Doméstica de Fluor en agua de consumo humano, 2010).

Desde hace mucho tiempo, se ha advertido la afinidad del flúor con el fosfato tricálcico, ya que se encuentran siempre contenidos apreciables de flúor en los fosfatos naturales, como la apatita, la fosforita, así como en los huesos. Parece que en la apatita, de fórmula  $3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2\text{CaCO}_3$ , el ion carbonato ha sido reemplazado por el flúor para dar el fluorapatita insoluble; el mismo papel de intercambiador de iones desempeña la hidroxiapatita (en el que el  $\text{CaCO}_3$  es reemplazado por  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ). Para la regeneración del material de intercambio se utiliza hidróxido de sodio, que convierte la fluorapatita nuevamente en hidroxiapatita eliminando el flúor como fluoruro de sodio soluble. Luego la hidroxiapatita actúa nuevamente de acuerdo al proceso mencionado anteriormente. En la práctica se utilizan:

- Productos naturales, extraídos de huesos de ganado especialmente: cenizas de huesos o huesos molidos.
- Apatita sintética, que puede obtenerse por una mezcla cuidadosamente controlada, de cal y ácido fosfórico. Existen varias experiencias no sólo a nivel de plantas experimentales, sino también en plantas correctoras de flúor instaladas en diversas localidades, que

utilizan como medio al hueso molido desgrasado. El origen del hueso puede ser de ganado vacuno proveniente de frigoríficos.

La técnica aplicada es la filtración del agua a tratar a través de fosfato tricálcico utilizando como material de intercambio hueso molido calcinado; el hueso a utilizar necesita de un tratamiento previo indispensable, para adecuarlo a los fines perseguidos, a fin de que rinda al máximo en su capacidad de intercambio y vida útil.

## **2.2.2 Tratamiento del Hueso**

Las diferentes fuentes consultadas presentan diversos tratamientos previos adecuados para la utilización como manto de relleno, a continuación se presentan algunos de ellos y sus especificaciones.

### **2.2.2.1 Tratamiento térmico:**

Se efectuaron experiencias de incineración del hueso con temperaturas entre 350 y 700°C con diversos tiempos de exposición. A temperaturas más elevadas y prolongado tiempo de quemado el hueso modifica su estructura físicoquímica perdiendo los grupos activos que le dan la capacidad de intercambio, se vuelve totalmente inactivo en forma irreversible, por lo que en ningún caso debe llegarse a estos extremos. Con temperaturas menores se obtuvo un hueso de características adecuadas.

## **2.2.3 Experiencias en Plantas de Tratamiento**

A partir de los ensayos de laboratorio, en plantas piloto y en plantas defluoradoras instaladas en distintas localidades de la Provincia de Buenos Aires proporcionan una serie de recomendaciones para alcanzar el mayor rendimiento en este tipo de plantas:

### **2.2.3.1 Lecho desfluorante:**

Los más aconsejados son los de hueso desgrasado por calcinación; los utilizados en su totalidad fueron vacunos aunque también se ensayaron huesos de equinos con igual éxito. La granulometría aconsejable es de 3 a 0,5 mm de diámetro una vez calcinado; tamaños mayores hacen que cierta parte no sea aprovechada por no llegar el agua a toda su masa; medidas menores

pueden rendir más pero está expuesta a mayores pérdidas y además suele originar apelmazamiento. En las primeras plantas instaladas se utilizó hueso de color blanco, desengrasado con soda y aparentemente sin vestigios de grasa, sin embargo la experiencia demostró que el agua tratada presentaba turbidez, olor y gusto que la inutilizaba, especialmente luego de una detención del servicio. La cantidad de hueso en el reactor se debe determinar teniendo en cuenta las características medias y el caudal a corregir, como así también el tiempo mínimo deseado entre las regeneraciones. La relación entre el diámetro y la altura debe ser tal que permita una expansión del lecho en el contra lavado de 30 a 50%.

### **2.2.3.2 Técnica de desfluoración:**

El ingreso al reactor debe proyectarse adecuadamente para evitar canalizaciones. La velocidad del agua a tratar deberá ser de aproximadamente 4 a 5 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.h, dependiendo de la concentración de flúor, el pH y la altura del manto. Otros autores proponen una carga superficial de diseño de 7 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.h. En el caso de altos valores de pH conviene previamente ajustar el mismo para lograr un mayor rendimiento y facilidad de tratamiento. Cuando el agua tratada que sale de la planta contiene 2 mg/l de flúor o más es necesario regenerar el manto de hueso. Los valores de intercambio pueden variar entre 790 g de F por m<sup>3</sup> de relleno (para F<sub>residual</sub>=0,60 mg/l) a 1020 g de F por m<sup>3</sup> de relleno (para F<sub>residual</sub>=1,20 mg/l).

### **2.2.3.3 Técnica de regeneración del hueso**

Consiste en reemplazar el flúor combinado a la molécula de hidroxifosfato de calcio donde desplaza al oxhidrilo para fijar el ion flúor. En la regeneración la soda cede su oxhidrilo y capta el ion flúor del agua que se une al sodio formando fluoruro de sodio, por lo que para regenerar el hueso es necesario pasar una solución de hidróxido de sodio en una determinada concentración (se estima como más conveniente la de 1 a 1,2%). Generalmente se utiliza el equivalente de tres o cuatros volúmenes de soda al 1% con respecto al volumen de hueso a regenerar. Se inicia bajando el nivel de agua del reactor hasta la capa de hueso, luego se comienza el lavado a contracorriente con suficiente presión como para fluidificar al lecho, el cual es conveniente que se expanda 30 a 50% de su espesor (esta operación puede realizarse además con aire).

A continuación debe vaciarse bien el equipo a regenerar, luego se agrega un primer volumen de soda al 1% hasta cubrir el hueso, se recircula a baja velocidad (entre 0,80 y 1 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.h) durante unas tres horas, manteniendo el manto siempre cubierto con la solución de soda. Se deja escurrir bien la misma y se cubre el hueso con agua de enjuague, se mantiene a baja presión durante una hora, luego se inyecta aire y se drena. Esta operación se repite dos o tres veces más, con lo cual queda listo para volver a entrar en servicio. Pese a los enjuagues que se realizan en el hueso queda un exceso de soda que es necesario neutralizar, para lo cual la mayoría de los autores aconsejan el empleo de dióxido de carbono. Como variante se utilizó ácido clorhídrico, inyectándolo al agua de lavado hasta bajar el pH a valores entre 5 y 6.

#### **2.2.3.4 Efluentes del proceso de regeneración**

La regeneración del hueso de las plantas de desfluoración origina un efluente que no siempre puede ser evacuado sin inconvenientes. En todos los casos que sea posible se debe tratar de descargarlos en redes colectoras cloacales o en su defecto se deben enviar a enlagueados, donde se evapore o infiltre, siempre que no afecte la capa de agua freática factible de utilizar. Una forma de contrarrestar buena parte de sus efectos es precipitando la mayor cantidad posible de flúor. El precipitante más activo resulta ser el sulfato de magnesio, seguido de cal (Ente Nacional de Obras Hídricas de Saneamiento, 2010).

### **2.3 MÉTODOS UTILIZADOS PARA LA REDUCCIÓN DE FLUORURO**

Existen diversos métodos de reducción de fluoruros utilizados a nivel mundial con los fines de llevar la concentración de este componente a valores aceptables para la salud humana. La mayoría de estos utilizan principalmente componentes químicos, que, dependiendo la técnica utilizada elevan los precios del tratamiento de aguas con altas concentraciones de fluoruros. Las condiciones bajo las que se realizan estos tratamientos deben controlarse para evitar variaciones significativas en otras propiedades fisicoquímicas del agua potable.

#### **2.3.1 Reducción de fluoruros con cal**

El ablandamiento con cal removerá el flúor del agua formando un precipitado insoluble y por coprecipitación con hidróxido de Magnesio (Mg(OH)<sub>2</sub>). La relativamente alta solubilidad del fluoruro de calcio limita la reducción del flúor por ablandamiento solo; pero igualmente puede

reducir altos niveles de flúor a niveles más aceptables. Las aguas con altas concentraciones de magnesio que deban ser ablandadas de cualquier manera pueden tener sus niveles de flúor reducidos apreciablemente por coprecipitación. Se ha desarrollado una ecuación teórica para predecir la cantidad de magnesio requerida para reducir el nivel de flúor a un nivel dado:

$$F_{\text{Residual}} = F_{\text{Inicial}} - (0.07F_{\text{Residual}} \times \sqrt{\text{Mg}})$$

Esta ecuación sugiere que para reducir el nivel de flúor de 5,0 a 1,5 mg/l se requerirían 100 mg/l de magnesio, que es un alto nivel de magnesio para encontrarlo naturalmente en el agua. La otra opción, que no es utilizada generalmente, es agregar magnesio para el ablandamiento (por ejemplo adicionando sulfato de magnesio); la desventaja de este proceso es la gran cantidad de lodos producidos.

### **2.3.2 Reducción de fluoruros por coagulación con sulfato de aluminio y otros coagulantes**

La coagulación con sulfato de aluminio reducirá los niveles de flúor a valores aceptables para agua de bebida, pero requiere grandes cantidades de sulfato de aluminio para hacerlo.

Estudios conducidos por Culp y Stoltenberg (1958) muestran que el flúor fue reducido de 3,6 a 1,4 mg/l utilizando 250 mg/l de sulfato de aluminio durante un tratamiento convencional (el agua así tratada podría contener una concentración muy alta de aluminio disuelto).

El pH para remoción de flúor por coagulación pareciera tener requerimientos óptimos; para una adecuada floculación con sulfato de aluminio, este valor se encontraría entre 5,5 a 7,0. Mientras que la coagulación con aluminio puede no ser la única solución para reducir los niveles de flúor, este método podría ser usado como un tratamiento de ajuste. Las limitaciones de este método, como ocurre con el ablandamiento, son las grandes cantidades de barro que podrían generarse. En el Centro de Ingeniería Sanitaria-FCEIA de la Universidad Nacional de Rosario se realizaron ensayos a escala de laboratorio a fin de tratar el agua subterránea de una localidad de la Provincia de Santa Fe con contenidos de arsénico (0,20 mg/l) y flúor (1,8 mg/l) fuera de la normativa vigente.

Para la remoción de flúor en una primera instancia se ensayaron dosis crecientes de trifosfato cálcico,  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ , con resultados positivos (flúor residual después del tratamiento: 0,8 mg/l) pero debiendo aplicar dosis muy altas (1000 mg/l) lo que resultaría antieconómico.

El Policloruro de Aluminio (PAC) que es un coagulante que se está utilizando en forma creciente en el tratamiento de aguas, en especial en los Estados Unidos y que ofrece ventajas respecto al uso del sulfato de aluminio; llegándose a que con una dosis de 50 mg/l de PAC se logran muy buenos resultados en cuanto a los valores residuales de flúor (F residual: 1.3 mg/l) y aluminio (Al residual: 0.03 mg/l). Estos ensayos continúan desarrollándose a nivel de planta piloto.

### **2.3.3 Alúmina activada**

Desde 1930, se conoce que el contacto de agua que contiene flúor con alúmina activada (óxido de aluminio calcinado) produce una remoción del mismo. Continuas investigaciones acerca de este fenómeno han permitido incrementar el conocimiento acerca de la remoción de flúor por medio de la utilización de este medio.

La alúmina activada es utilizada en la misma forma que las resinas de intercambio iónico; se piensa que la alúmina activada remueve ciertas especies del agua debido a una adsorción hidrolítica. Es una sustancia anfótera y su punto isoelectrónico está asociado a un pH de 9,5; por lo tanto removerá aniones por debajo de este pH y cationes por encima del mismo; la remoción óptima de flúor pareciera ocurrir en un rango de pH entre 5 y 8.

Estudios realizados muestran que la capacidad de la alúmina activada para remover flúor se incrementa con el aumento de la concentración de este último respecto al tamaño de las partículas de alúmina activada, la cinética de remoción es tal que las partículas de menor tamaño proveen la más rápida captación del flúor; aunque deberá tenerse en cuenta que las partículas más pequeñas tendrán una gran tendencia a eliminarse en la operación de lavado. Se recomienda un tiempo mínimo de contacto de 5 minutos para remoción de flúor.

Uno de los más recientes avances en el desarrollo de las técnicas de remoción de flúor con alúmina activada es la reducción del pH del agua cruda por el agregado de  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , esto trae las siguientes ventajas en el proceso:

- Un incremento de la capacidad de adsorción de la alúmina activada, pudiéndose alcanzar valores de 6 a 7 g de F por kg. de  $Al_2O_3$ , ajustando el pH a un valor cercano a 5,5 y utilizando granulado pequeño de alúmina activada.
- Se eleva la velocidad de filtración a un rango de 7 a 10 m/h.
- La unidad de adsorción puede mantenerse trabajando en forma continua. Pero también trae aparejado algunos problemas, principalmente:
  - El valor de pH del efluente es muy bajo.
  - El sabor del efluente es desagradable debido al alto contenido de  $SO_4^{2-}$ .
  - La operación es complicada y poco segura.

La alúmina activada puede ser regenerada con NaOH (también otra alternativa es la regeneración con sulfato de aluminio); los iones de hidróxido son preferidos a los aniones por la alúmina, y rápidamente reemplazarán el flúor de la alúmina.

#### **2.3.4 Técnica Nalgonda**

La técnica Nalgonda fue desarrollada por el Instituto Nacional de Investigación en Ingeniería Ambiental (NEERI) de la India en 1974, y la primera implementación práctica de esta tecnología fue llevada a cabo por Nawlakhe en 1975. Está técnica se basa fundamentalmente en el concepto tradicional de reducción de flúor utilizando sales de aluminio, solo se diferencia de la técnica tradicional por ligeras modificaciones realizadas a nivel experimental y que incluyen entre otras: tratamiento en dos etapas y etapa final de ajuste con filtro de hueso molido.

Esta parte de desarrollo de la tecnología todavía no había sido beneficiosa para las muchas poblaciones que sufren el problema de exceso de flúor en sus aguas de bebida, debido principalmente a los altos costos del método. Esta tecnología todavía continúa investigándose; se destaca además que en el año 1994 se realizaron algunas modificaciones a la técnica Nalgonda en Tanzania las cuales han resultado ser exitosas.

La técnica Nalgonda ha mostrado ser muy efectiva en la remoción de flúor en agua de bebida. El método es muy simple, pero las reacciones químicas que intervienen en el proceso son complejas y algunas no son totalmente entendidas. La técnica puede ser descripta como un

proceso de co-precipitación, donde aluminio (en forma de  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ) y cal (en forma de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) se agregan al agua cruda que contiene flúor.

De esta mezcla resultan cuatro tipos de procesos: coagulación, floculación, adsorción y sedimentación.

- Coagulación: se refiere a las reacciones químicas entre el aluminio y el agua permitiendo la formación de  $\text{Al}(\text{OH})_3$ . El agregado de cal tiene por objetivo mantener valores de pH entre 6 a 7.
- Floculación: es la secuencia de reacciones electrostáticas que llevan al aglutinamiento de las partículas coloidales (formadas durante la coagulación) para formar grandes flóculos.
- Adsorción: el flúor se remueve por adsorción del mismo en la fase sólida; la adsorción sucede principalmente durante la coagulación, pero también durante la floculación y se ha determinado que la remoción de flúor sucede en los primeros segundos del tratamiento.
- Sedimentación: la formación de los flóculos facilita este cuarto proceso que es la sedimentación de partículas.

En los años recientes se continuaron realizando experiencias a fin de mejorar la eficiencia de este método, entre las que se pueden citar: tratamiento en dos etapas iguales con la mitad de productos químicos utilizados en cada etapa, utilización de carbonato de calcio en vez de cal, etc. La técnica Nalgonda es un método efectivo para remoción de flúor, pero es especialmente adecuado cuando el agua a tratar no tiene altas concentraciones de flúor.

### **2.3.5 Precipitación por contacto**

Este método para remoción de flúor en agua de bebida fue testeado a nivel de una villa escolar en Tanzania, la planta consiste de una columna de contacto, conteniendo una pequeña cantidad de relleno (hueso molido), sobre el cual se mantiene un gran espacio de sobrenadante de agua cruda y donde se produce el agregado y mezcla de fosfato dihidrógeno de sodio ( $\text{NaH}_2\text{PO}_4\text{H}_2\text{O}$ ) y cloruro de calcio ( $\text{CaCl}_2\text{H}_2\text{O}$ ).

La mezcla fluye lentamente en forma descendente a través del relleno de hueso molido y se dispone en la parte inferior del reactor un falso fondo de grava. El agua defluorada que sale del

reactor se envía a un tanque de agua tratada. La velocidad de filtración en el reactor no debe superar 1 m/h.

Se operó esta planta a nivel de pequeña escala durante aproximadamente un año. Las concentraciones de flúor en el agua cruda durante este período oscilaron entre 8,2 y 13 mg/l, mientras que la concentración promedio de flúor en el agua tratada fue de 0,4 mg/l.

## **2.4 SISTEMAS DE TRATAMIENTO UTILIZADOS PARA ACONDICIONAR AGUAS SUBTERRÁNEAS**

El agua subterránea está siempre conectado a las aguas superficiales. Después de todo, el agua subterránea finalmente se convierte en agua superficial dentro del ciclo hidrológico (en mares, lagos o ríos). Esta interacción también puede lograrse artificialmente cuando el agua subterránea se extrae cerca de aguas superficiales, por ejemplo, durante la filtración a la orilla del río, o cuando el agua de la superficie es transportada a los sistemas de aguas subterráneas, como durante la recarga de los acuíferos.

La disponibilidad de agua subterránea está fuertemente ligado a la situación local. Una importante división se puede hacer entre la abstracción de agua subterránea freática, que tiene una reserva de agua libre, y confinada, y el agua subterránea artesiana, que está encerrado por una capa no permeable.

El agua subterránea freática está fuertemente influenciada por dentro y fuera de flujos tales como lluvias, por lo que incluso, sin la interferencia humana del manto freático, este fluctuará significativamente.

El agua artesiana está confinado por una capa impermeable, lo que resulta en la acumulación de presión hidráulica. Este es también el agua subterránea caracterizado por largos tiempos de residencia en el acuífero, lo que resulta en los cambios en la calidad del agua, por ejemplo, la mejora de fiabilidad microbiana, así también deterioro de la calidad por el la disolución de los componentes inorgánicos.

Por lo tanto, el agua subterránea está disponible en diferentes circunstancias, pero ¿cómo la conseguimos por encima del suelo? A veces, las aguas subterráneas pueden surgir de forma

espontánea como en un manantial, y, a veces, tiene que ser abstraído de lo más hondo. Por ejemplo, en los Países Bajos, los pozos se reducen a 200 metros, mientras que en las regiones áridas, los pozos se encuentran más allá de 1,500 metros.

Instalaciones para extracción de agua subterránea pueden ser relativamente simples para descargar libremente el agua subterránea, llamada captura de manantial, pero también puede ser casi tan complicado como la extracción de petróleo en profundidades extremas.

Una buena división puede ser los pozos horizontales y verticales, que se puede aplicar tanto para las aguas subterráneas profundas y como para las aguas poco profundas.

La abstracción horizontal superficial es muy atractivo en áreas como las dunas holandesas, donde el agua dulce flota en la parte superior del agua salada subyacente. Los pozos horizontales profundos se encontraron en Persia en los tiempos antiguos, pero aún existen en la actualidad.

Hoy en día, los llamados pozos radiales se utilizan para la abstracción de agua de los acuíferos estrechos a mayores profundidades. Estos pozos también son llamados pozos de Ranney, debido a su inventor Leo Ranney.

Para la captación vertical de aguas subterráneas poco profundas, se puede utilizar un pozo excavado, sin embargo, es importante proteger el agua de su entorno, como la contaminación fecal de las letrinas o debido al almacenamiento.

El método más usado para la extracción vertical de las aguas subterráneas es perforar pozos tubulares. Teniendo en cuenta el área de contacto requerida con el acuífero, estos tipos de pozos sólo se aplica en los casos en los acuíferos tienen suficiente espesor. Una serie de pozos tienen que ser construidos para capacidades más grandes. Cada cual puede ser suministrado con su propia bomba, o puede ser drenado en el centro con un sistema de vacío.

La extensión del tratamiento necesario para convertir las aguas subterráneas abstraídas en agua potable puede ser determinada basándose en el tipo de las aguas subterráneas y su composición y calidad del agua. En algunos casos, sin embargo, el agua subterránea ya es adecuada para beber sin ningún tratamiento.

Con respecto a la producción de agua potable, tres diferentes tipos de aguas subterráneas pueden ser más o menos distinguidos:

- Las aguas subterráneas aeróbicas.
- Las aguas subterráneas ligeramente anaerobias.
- Las aguas subterráneas profundas anaeróbicas.

El tipo de aguas subterráneas puede identificarse midiendo parámetros, como la concentración de oxígeno, potencial redox, concentraciones de hierro y metano. Cada tipo de agua subterránea tiene su propio esquema de tratamiento típico. Se iniciará con el esquema de tratamiento para las aguas subterráneas de tipo aeróbico, que tiene un manto freático abierto y está, por lo tanto, conectado a la atmósfera, y por lo tanto contiene oxígeno.

#### **2.4.1 Aguas subterráneas aeróbicas**

Para las aguas subterráneas aeróbicas sólo los parámetros de pH, calcio, índice de saturación y bicarbonato deben ser tomados en cuenta. Los otros parámetros generalmente cumplen con los aspectos que son requisitos normados.

El esquema de tratamiento de las aguas subterráneas aeróbicas es generalmente muy simple, y consiste en la aireación con el posterior, opcional, acondicionamiento o ablandamiento. La fase de aireación aumentará la concentración de oxígeno y al mismo tiempo reduce la concentración de dióxido de carbono. En la figura 2.2 se observa una cascada de aireación, utilizada para el tratamiento de aguas subterráneas.

Se entiende por aireación el proceso mediante el cual el agua es puesta en contacto íntimo con el aire con el propósito de modificar las concentraciones de sustancias volátiles contenidas en ella. En las plantas de ablandamiento se utiliza la aireación para remover CO<sub>2</sub> antes de ablandar con cal.

Los principales aireadores, utilizados comúnmente en la purificación de aguas de pozos son los de tobera, de cascada, canales y canales inclinados y aireadores de bandeja.

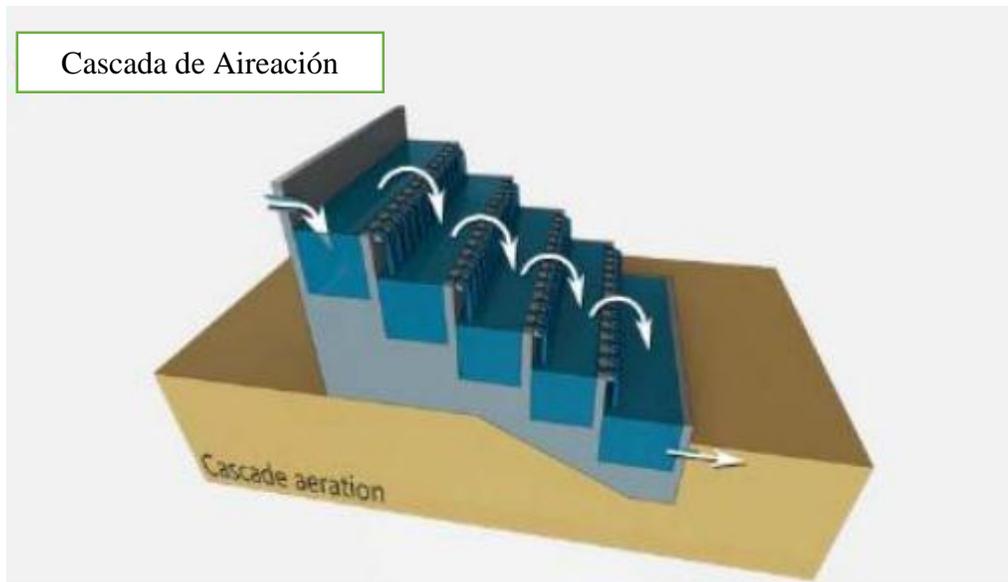


Figura 2.2. Cascada de Aireación (*Van Halem, 2015*)

Es deseable un acondicionamiento cuando el agua subterránea es aeróbica y se abstrae de suelos arenosos, donde nada de calcio está disponible en el subsuelo. El agua se llama agua suave o agresiva. Esto es causado por una serie de procesos de degradación del subsuelo que provocan dióxido de carbono en el agua por encima de la concentración de equilibrio. Con un índice de saturación por debajo de 0 el agua puede corroer las tuberías durante la distribución.

El índice de saturación, o SI, se puede aumentar a través de la aireación, pero debido a bajas concentraciones de bicarbonato todavía puede ser recomendable aplicar una etapa de acondicionamiento, tales como filtración de piedra caliza. En la figura 2.3 se muestra un esquema de proceso tratamiento o acondicionamiento de aguas subterráneas aeróbicas.

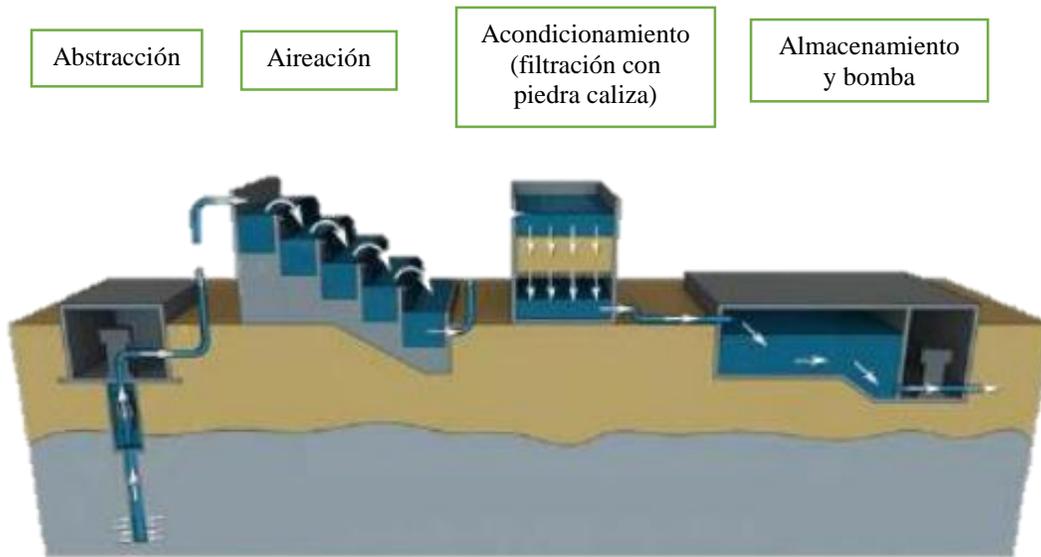


Figura 2.3. Tratamiento de agua subterránea aeróbica (*Van Halem, 2015*)

En los casos en que las aguas subterráneas se abstraen de forma aeróbica de suelos ricos en calcio, el dióxido de carbono ha disuelto bicarbonato y calcio en el agua subterránea, lo que resulta en la producción de agua dura.

Después de la abstracción, el agua dura se vuelve sobresaturada con respecto al carbonato de calcio, debido a la pérdida de dióxido de carbono. Para evitar la precipitación de carbonato de calcio en la red de distribución o en máquinas de lavado de los consumidores y calentadores, el agua se ablanda.

Este ablandamiento se puede hacer por los productos químicos de dosificación, tales como sosa cáustica o cal, para aumentar el pH y causan un desplazamiento del equilibrio en un reactor de gránulos. El reblandecimiento puede ser también alcanzado por las resinas de intercambio de cationes.

#### 2.4.2 Aguas subterráneas ligeramente anaerobias

El esquema de tratamiento de agua para las aguas subterráneas ligeramente anaeróbicas se diferencia del régimen de las aguas subterráneas aeróbicas. Una parte de agua subterránea anaeróbica se encuentra debajo de una capa de confinamiento, y se caracteriza por la falta de oxígeno y la presencia de amonio, hierro y manganeso.

En general, el tratamiento de las aguas subterráneas ligeramente anaerobia consta de aireación seguida por filtración en medios granulares sumergidas. Es necesario para la aireación adición de oxígeno y la eliminación de dióxido de carbono. Se utiliza oxígeno para la oxidación de hierro ferroso o  $\text{Fe}^{2+}$  a hierro férrico, o  $\text{Fe}^{3+}$ , pero también es necesario para la oxidación de amonio y manganeso. En la figura 2.4 se puede observar un esquema del proceso utilizado para acondicionar aguas ligeramente anaerobias.

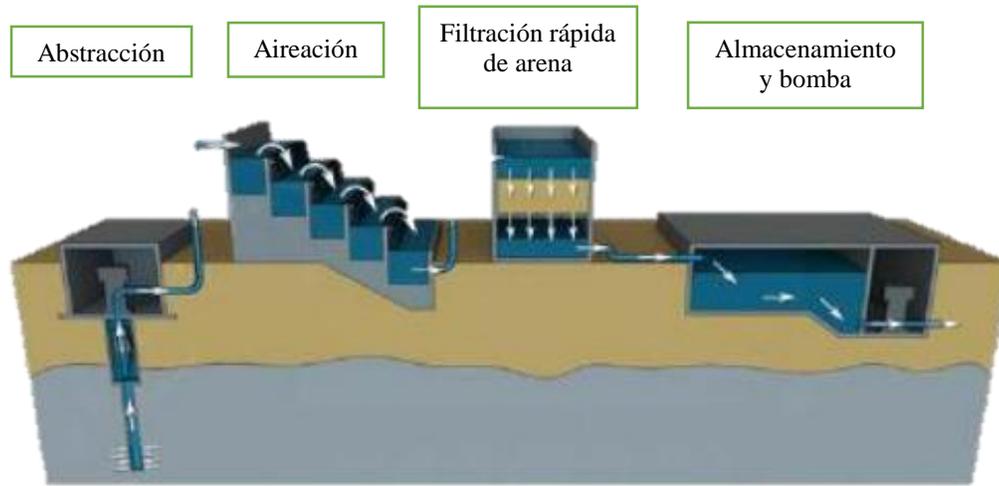


Figura 2.4. Tratamiento de agua subterránea ligeramente anaeróbica (*Van Halem, 2015*)

La aireación es seguida por filtración de arena, en la que el óxido de hierro férrico hidroliza a flóculos de hidróxido de hierro, que son eliminados por filtración en el lecho de arena. El manganeso se somete a una transformación química parcial y biológica, mientras el amonio es biológicamente degradado por las bacterias a nitrato.

El crecimiento de estas bacterias, en combinación con el hierro y flóculos de manganeso, resultan en un aumento de la resistencia del filtro y se necesita el lavado a contracorriente para evitar la obstrucción.

### 2.4.3 Aguas subterráneas profundas anaeróbicas

Para las aguas subterráneas anaeróbicas profundas. Tanto el oxígeno y nitrato están ausentes en esta agua subterránea, y la materia orgánica se descompone con sulfato como oxidante. En las aguas subterráneas profundas anaeróbicas, hierro, manganeso y especialmente amonio están presentes en altas concentraciones, además de sulfuro de hidrógeno y metano.

Para la eliminación de amonio se requiere una gran cantidad de oxígeno, incluso más oxígeno que puede disolverse en el agua durante la aireación, en otras palabras, más de la concentración de saturación. En la figura 2.5 se muestra un esquema de tratamiento para aguas profundas anaerobias.

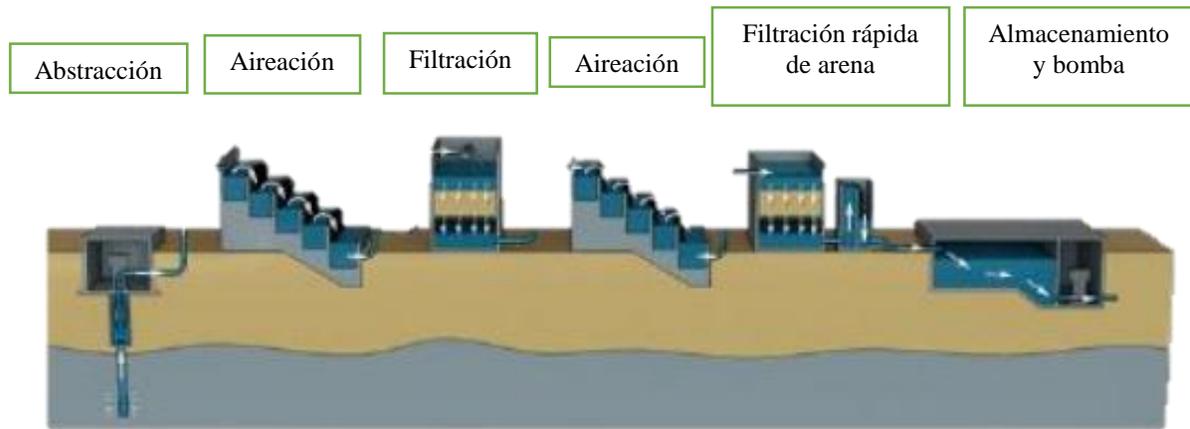


Figura 2.5. Tratamiento de agua subterránea aeróbica profunda (Van Halem, 2015).

Para evitar condiciones anaeróbicas en el filtro de arena, se pueden aplicar doble filtración sumergida o filtración seca, seguidos por filtración sumergido regular en casos de altas concentraciones de amonio. Un filtro seco se diferencia de un filtro húmedo.

En un filtro seco, el aire pasa a lo largo de los granos de arena, junto con el agua, alojando el oxígeno del aire para reponer el oxígeno en el agua durante la filtración. La filtración en seco es seguida por filtración sumergida, ya que, en un filtro seco, puede producirse la penetración de partículas (Van Halem, 2015).

En la figura 2.6 se muestra un esquema de equipo utilizado para filtración seca y filtración rápida de arena.

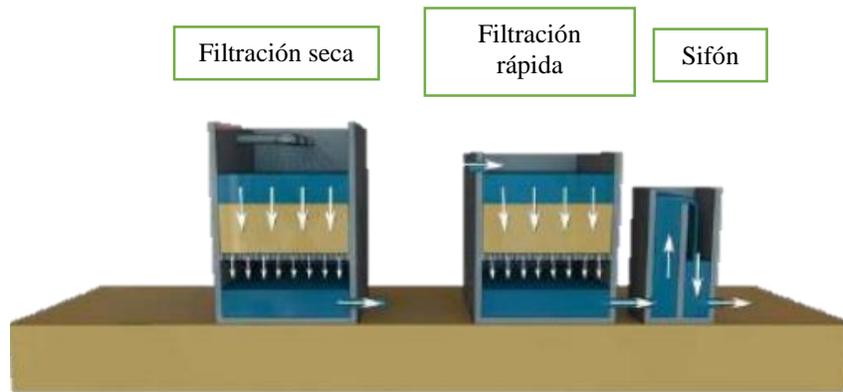


Figura 2.6. Filtración en seco y Filtración rápida de arena (Van Halem, 2015)

## 2.5 DESCARGA DE AGUAS RESIDUALES A CUERPOS RECEPTORES.

La regeneración del hueso origina un efluente que no siempre puede ser evacuado sin inconvenientes, debido a que este por el grado de adsorción de flúor puede causar daño al cuerpo receptor y/o al entorno donde se desecharía, es por eso que se debe hacer uso de La Norma de Descarga de Cuerpos Receptores “NSO 13.49.01:06 agua. Aguas residuales descargadas un cuerpo receptor”, donde se encuentra los parámetros permisibles de descargas para aguas residuales, como se muestra en la tabla 2.1 a continuación.

Tabla 2.1. Valores máximos permisibles de fluoruros para descarga a un puerto receptor

Parámetros	Valores Máximos permisibles
fluoruros (mg/L)	5

Fuente: NSO 13.49.01:06

- 1) Efluente líquido no deberá incrementar color visible al cuerpo receptor
- 2) El valor de pH 5,5-9,0 aplica para descargas en aguas limnicas; definiéndose un valor de pH entre 6.0-9.5 para vertidos en aguas costero marinas
- 3) En todo caso la temperatura del H<sub>2</sub>O de descarga al cuerpo receptor no podrá alterar  $\pm 5$  °C, con respecto a la temperatura natural del cuerpo hídrico receptor.

4) No se incrementara en 5 Unidades la turbidez del cuerpo receptor.

A continuación, en la tabla 2.2 se presentan los requerimientos para la toma de muestras.

Tabla 2.2. Requerimiento para toma de muestras recipientes para muestreo y preservantes de componentes en agua

Parámetros	Recipientes	Preservarte	Tiempo máximo de almacenamiento	Vol. Mínimo de muestra mL
<b>Fluoruro</b>	Polietileno	Enfriar 4 °C	7 días	300

Fuente: NSO 13.49.01:06

Para este caso se utilizaron 5 recipientes de polietileno de 1 L para la toma de muestras y se enfriaran a una temperatura de 4 °C.

El tiempo de almacenamiento para hacer los análisis correspondientes deberá ser de 4 horas para lograr un análisis adecuado.

## 2.6 CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES GRANULARES

Los medios granulares son conglomerados discretos de partículas macroscópicas de diferentes tamaños y formas, los cuales interactúan, principalmente, mediante dos fuerzas: la repulsión elástica y la fricción. Debido a la acción de dichas fuerzas estos materiales exhiben una amplia variedad de propiedades que conllevan a un comportamiento físico, tanto estático como dinámico, particular, diferente de aquel que caracteriza a sólidos y líquidos

Por un lado, el comportamiento de los medios granulares es similar al de los líquidos, ya que estos adquieren la forma de su contenedor y son capaces de fluir dada una cierta inclinación; por el otro, es similar al de los sólidos cuando son sometidos a deformación. Es decir, unidades granulares estáticas se asemejan a los sólidos en cuanto a su habilidad para resistir esfuerzos compresivos y de cizalla. Sin embargo, incluso los casos más simples de capas esféricas contenidas en una celda de compresión muestran patrones de esfuerzos muy complejos. Por estas singularidades muchos autores han sugerido que los materiales granulares sean considerados como un estado de materia adicional, caracterizado por tres aspectos destacables:

- La existencia de fricción estática entre los granos.
- El hecho de que la temperatura es irrelevante.
- La naturaleza inelástica de las colisiones para granos en movimiento.

Si las partículas que conforman la materia granular no son cohesivas, entonces las fuerzas entre ellas son únicamente repulsivas y la forma de las mismas queda subordinada a los bordes externos y a la gravedad. De hecho, uno de los modelos que existen para explicar el comportamiento de la materia granular estipula que esta se compone de un conjunto de esferas sólidas inelásticas, entre las cuales no existen fuerzas de atracción y cuyas interacciones son inelásticas, habiendo pérdida de energía mecánica en cada colisión de las partículas (Rodríguez, 2011).

### **2.6.1. Granulometría**

Una forma de medir tamaños de partícula es haciéndolas pasar por mallas o tamices de distintas aperturas (ver imagen). La apertura también se denomina luz del tamiz. Todas las partículas que atraviesen el tamiz tendrán un tamaño menor que su luz.

Utilizando una serie de tamices de aperturas decrecientes apilados se consigue fraccionar el sistema en muestras de distintos tamaños de grano. Lo que queda retenido en un tamiz tiene un tamaño de partícula comprendido entre la apertura de dicho tamiz y la del tamiz inmediatamente anterior.

De este modo se acotan los intervalos de tamaño de grano. Determinar el número de partículas en cada tamiz es muy complicado cuando el tamaño es pequeño, por lo que se utiliza la masa retenida. Pesando lo que ha retenido cada tamiz se obtiene el porcentaje en peso de material para cada intervalo de tamaños.

Existen tamices metálicos con mallas de aperturas cuadradas desde 125 mm hasta unas 40 micras de lado. La norma UNE 7 050-2 describe las características y los nombres de los tamices que deben emplearse en las granulometrías en Europa, según la normativa en vigor. Una serie de tamices habitualmente utilizada es 100, 80, 63, 50, 40, 25, 20, 12.5, 10, 6.3, 5, 2, 1.25, 0.40, 0.160 y 0.080 mm de apertura. (Universidad de Almería , 2015)

### 2.6.2 Porosidad

Debido al proceso de fabricación de diferentes materiales granulares, los granos no están en contacto continuo unos con otros, dejando espacios vacíos dentro de ellos. El conjunto de espacios vacíos en recibe el nombre de poros. Si los poros y fisuras de un material granular se deformaran hasta que desaparecieran, al ser este sometido a una gran presión hidrostática, se obtendría un sólido ideal denominado matriz. Por lo tanto, el volumen total del sólido está compuesto por la suma entre el volumen de poros y el volumen de la matriz, tal como se muestra en la siguiente expresión:

$$V_{Total} = V_{Poros} + V_{Matriz}$$

La porosidad de un material es una medida de la capacidad de almacenamiento de fluidos que posee el mismo y está definida como la relación entre el volumen total ocupado por los poros y el volumen total del sólido, lo que se ilustra por medio de la relación:

$$\emptyset = \frac{V_{Poros}}{V_{Total}}$$

El volumen de espacio disponible para almacenar fluido siempre será menor al volumen total, por ende la porosidad es una fracción, generalmente expresada en tanto por uno. No obstante, es muy útil ilustrar la porosidad como un porcentaje del volumen total. No obstante, esta definición no brinda información acerca de la distribución, interconexión y tamaño del espacio poroso, lo que implica que diferentes tipos de rocas o medios granulares pueden tener porosidades iguales y, aun así, presentar propiedades físicas diferentes, como la permeabilidad.

Dado que la porosidad es una medida de la capacidad de almacenamiento de fluidos de un sistema, uno de los parámetros más utilizados para determinar la calidad de materiales granulares y rocas o yacimientos de estas. (Rodríguez, 2011)

### 2.6.3 Permeabilidad

Al estudiar el movimiento de fluidos en materiales porosos desde una perspectiva experimental y macroscópica es necesario hablar de la permeabilidad. La permeabilidad se define como la capacidad que tiene una roca de permitir el flujo de fluidos a través de sus poros interconectados.

Si los poros de la roca no se encuentran interconectados no hay permeabilidad. Por lo tanto, la permeabilidad depende de la porosidad efectiva y, con ello, depende más específicamente del escogimiento de los granos, el grado compactación, el grado de cementación y la presencia de minerales de arcilla en una roca. Generalmente la permeabilidad aumenta con la porosidad, lo que implica que para un mismo tipo de roca la relación entre estas dos propiedades petrofísicas se aproxima a una línea recta cuando la permeabilidad es graficada en escala logarítmica, sin embargo, cada tipo de roca exhibirá una relación particular.

Para entender la definición de permeabilidad es necesario comprender la relación fundamental que mide el flujo de líquido dentro de un material granular. Para ello se definirán los conceptos de tasa de flujo y viscosidad.

Tasa de flujo: la tasa de flujo se define como el volumen de fluido que pasa por una sección transversal por unidad de tiempo. Por lo tanto, sus unidades son de longitud/tiempo. En forma general la tasa de flujo puede expresarse como:

$$q_x = \frac{\Delta V}{\Delta t}$$

Viscosidad: la viscosidad es la medida de la resistencia que presenta el flujo a fluir. En los fluidos ideales no se originan esfuerzos de cizalla que tienden a oponerse al movimiento cuando dicho fluido comienza a desplazarse bajo la acción de alguna fuerza. Por lo tanto, en los fluidos ideales la viscosidad, que mide las fuerzas internas de roca del fluido, es cero. Por otra parte los fluidos Newtonianos como el gas, el agua o los hidrocarburos presentan viscosidad y esta es función de la temperatura del fluido. De forma general la viscosidad disminuye a medida que la temperatura aumenta.

La permeabilidad es también una propiedad anisótropa del medio poroso, por lo tanto puede variar en función a la dirección a la cual es medida. La permeabilidad horizontal del yacimiento ( $K_h$ ) se obtiene a partir de núcleos tomados en dirección paralela al flujo de fluidos dentro de dicho yacimiento, mientras que la permeabilidad vertical ( $K_v$ ) se mide en núcleos tomados perpendicularmente respecto a la dirección del flujo

Existen algunos factores que relacionan la permeabilidad intrínseca con el tamaño de los granos que componen un sedimento. Estos factores se enuncian a continuación:

1. La permeabilidad aumenta a medida que aumenta el tamaño medio de grano.
2. Para un tamaño fijo del diámetro de las partículas, la permeabilidad es inversamente proporcional a la desviación estándar del tamaño de los sedimentos. Es decir, la permeabilidad, al igual que la porosidad, depende del escogimiento de los granos del sedimento. Para altas desviaciones estándar (muestras que presentan mal escogimiento) la permeabilidad disminuye, puesto que los granos de menor tamaño ocupan espacio en los poros del sistema, reduciendo la capacidad de transporte de fluido a través del mismo.
3. Muestras unimodales, las cuales presentan un solo tamaño de grano dominante, tienen permeabilidades más grandes que aquellas que presentan dos o más tamaños de grano en su composición. (Rodríguez, 2011)

### **CAPÍTULO 3. DISEÑO DE EXPERIMENTOS PARA REDUCIR FLUORUROS EN AGUA DE POZO**

Se presenta en este apartado la metodología utilizada para la recolección y preservación de las muestras utilizadas para la caracterización del agua del pozo en estudio y para la realización de una prueba piloto con el sistema de remoción de flúor; como parte de los objetivos de la investigación se analizarán dos alternativas hueso bovino desgrasado y hueso bovino calcinado, se presenta la metodología utilizada para la preparación antes de la realización de pruebas de su efectividad utilizando el equipo de jarras. Además se presenta un estudio experimental a nivel de laboratorio para determinar la efectividad del hueso bovino calcinado en la remoción de fluoruros de agua, aplicando un análisis preliminar para demostrar su efectividad y posteriormente desarrollando un experimento controlando las variables principales que influyen en el proceso de remoción; de manera tal que puedan obtenerse relaciones entre variables que favorezcan la remoción de flúor con la finalidad de obtener parámetros útiles para el diseño de un sistema de remoción de fluoruros para aguas de consumo humano. Se desarrollará un diseño experimental del tipo factorial  $2^k$  para determinar los efectos significativos que puedan tener diferentes variables sobre la variable respuesta, para lo cual se determinó las variables principales que podrían afectar al proceso de remoción de fluoruros y sus diferentes

combinaciones para llevar a cabo los experimentos. Posterior a definir parámetros se realizara el ensamble de todo el sistema de tratamiento y se probara su efectividad mediante pruebas a nivel de laboratorio utilizando los parámetros definidos en el experimento anterior.

### **3.1 METODOLOGÍA ESTÁNDAR PARA LA TOMA Y PRESERVACIÓN DE LA MUESTRA**

La recolección de las muestras depende de los procedimientos analíticos empleados y los objetivos del estudio.

El objetivo del muestreo es obtener una parte representativa del material bajo estudio (cuerpo de agua, efluente industrial, agua residual, etc.) para la cual se analizaran las variables fisicoquímicas de interés. El volumen del material captado se transporta hasta el lugar de almacenamiento (cuarto frío, refrigerador, nevera, etc.), para luego ser transferido al laboratorio para el respectivo análisis, momento en el cual la muestra debe conservar las características del material original. Para lograr el objetivo se requiere que la muestra conserve las concentraciones relativas de todos los componentes presentes en el material original y que no hayan ocurrido cambios significativos en su composición antes del análisis (Calderon, 2013).

#### **3.1.1 Ubicación del punto de muestreo**

Para la realización de los muestreos de agua se ha identificado un grifo en la cañería que alimenta al tanque de almacenamiento del sistema de abastecimiento del caserío, por lo que se garantiza que el agua obtenida viene directamente del pozo.

#### **3.1.2 Tiempo y frecuencia del muestreo**

Dentro de periodo en el que se desarrolle el estudio se realizaran tres muestreos de agua de acuerdo al avance del mismo atendiendo la siguiente programación:

- a. Muestreo inicial para realizar un sondeo de la concentración de fluoruros presente en el agua.
- b. Muestreo para la caracterización del agua del pozo analizando parámetros generales establecidos previamente: Fluoruros, color, conductividad, sulfatos, pH, sólidos totales disueltos, Turbiedad, dureza total, Hierro total y Nitrato.

- c. Muestreo para la etapa experimental de selección del tipo hueso bovino a utilizar y determinación de la temperatura de calcinado del hueso bovino.
- d. Muestreo final para la utilización en el sistema de tratamiento a nivel de laboratorio para verificar la efectividad del sistema en la remoción de flúor.

### **3.1.3 Volumen de muestras**

Volumen recolectado depende del uso al que se destinara el agua, por lo que para la realización de análisis se ha muestreado volúmenes de agua de 5 litros en botellas individuales de 1 litro y para los procedimientos experimentales se ha recopilado volúmenes de 4 a 8 galones en envases plásticos individuales de 1 galón.

### **3.1.4 Selección de envases**

El material de los envases, debe ser inerte, de manera que no produzca alteraciones en la composición de la muestra, tales como pérdidas por adsorción, volatilización o contaminación por materias extrañas. En general los materiales más utilizados son el vidrio neutro y el polietileno de alta densidad, requiriéndose en algunos casos materiales más específicos como por ejemplo el vidrio ámbar o el politetrafluoretileno PTFE, ya sea para el envase mismo o para sus tapas.

### **3.1.5 Procedimiento de recolección**

- a. Desinfectar el accesorio de salida utilizando alcohol o una solución de hipoclorito de sodio.
- b. Abrir la llave del grifo para evacuar el agua retenida y ya que el punto escogido para la toma de muestras es antes del tanque de abastecimiento asegurarse que se está bombeando agua a dicho tanque.
- c. Usar recipientes nuevos de boca estrecha y de rosca con sello los cuales deben enjuagarse 7 veces con el agua de muestra.
- d. Llenar los envases hasta el límite para evitar la presencia de aire en el frasco.
- e. Etiquetar los botes con la fecha, hora y lugar de toma de la muestra.

### **3.1.6 Transporte, preservación y conservación de las muestras.**

#### a. Transporte y preservación

- La técnica de preservación mediante refrigeración se debe aplicar durante la recolección y el transporte, como también en la mayoría de los casos en el laboratorio mientras las muestras están en espera de ser ensayadas, la temperatura de refrigeración debe ser entre 1 y 4 °C para muestras bacteriológicas y de  $4 \pm 2^{\circ}\text{C}$  para muestras físico-químicas, evitando la congelación en ambos casos.
- El transporte de los envases se deberá realizar en recipiente plástico con hielo debidamente tapado para evitar la radiación solar y el calor, las muestras deberán ser llevadas inmediatamente al laboratorio para la realización de los análisis.  
Para la preservación no será necesaria la adición de ningún preservante químico debido al tipo de parámetros de interés a analizar, como se muestra en el anexo 3.

#### b. Conservación

- El tiempo de almacenamiento afecta en mayor medida a algunas determinaciones, ya sea por pérdidas debidas a adsorción en las paredes de los envases, intercambios iónicos, precipitación, solubilidad, actividad microbiana u otra serie de reacciones. Este tiempo se debe reducir al mínimo posible, siendo necesario incluso que algunos análisis sean realizados en terreno, en el mismo momento del muestreo.
- Para el caso de los ensayos que por su complejidad o especialización se deben efectuar en el laboratorio, lo recomendado es que se ejecuten en forma inmediata luego del ingreso de las muestras, lo que en la realidad, muchas veces, esto no se cumple. Por esta razón es que, sumado a las técnicas de preservación, se debe limitar el tiempo máximo de almacenamiento, el que dependerá de las características y naturaleza de la muestra y de la estabilidad de cada analito en particular, ver anexo 4.

### **3.2 CARACTERIZACIÓN DEL AGUA DEL POZO Y ANÁLISIS DE FLUORUROS A LAS MUESTRAS.**

Para caracterizar el agua del pozo se utilizarán los parámetros que, de acuerdo al Laboratorio de Aguas de la Facultad de Química y Farmacia de la Universidad de El Salvador, son las mínimas que deben verificarse para aguas subterráneas que van a ser potabilizadas, los cuales son los

siguientes: fluoruros, color, conductividad, sulfatos, pH, sólidos totales disueltos, turbiedad, dureza total, hierro total y nitratos.

### 3.2.1 Caracterización del agua del pozo

Los datos obtenidos al realizar la caracterización fisicoquímica del agua proveniente del pozo del caserío Escamil revelan que existen dos parámetros que sobrepasan los límites máximos permisibles en la norma obligatoria salvadoreña NSO 13.07.02:08, estos son pH y fluoruro, ver tabla 3.1, por lo que el principal fin de la presente investigación es lograr la reducción de la concentración de fluoruros en el agua del pozo, los análisis realizados son una evidencia de la elevada concentración de este parámetro en el agua analizada.

Tabla 3.1. Caracterización de los principales parámetros del agua de pozo del caserío Escamil

<b>Parámetro</b>	<b>Valor medido en el agua</b>	<b>Límite máximo permisible según NSO 13.07.02:08</b>
<b>pH</b>	9.03	8.5
<b>Turbidez</b>	1.78 NTU	5 NTU
<b>Conductividad</b>	625 $\mu$ s/cm	
<b>Sólidos totales disueltos</b>	416 mg/L	1000 mg/L
<b>Color</b>	0 Pt-Co	15 Pt-Co
<b>Sulfatos</b>	144.18 mg/L	400.0 mg/L
<b>Nitratos</b>	2.8 mg/L	45 mg/L
<b>Dureza</b>	10.14 mg/L	500 mg/L
<b>Fluoruros</b>	4.08 mg/L	1 mg/L

Fuente: Elaboración propia

### 3.2.2 Análisis de fluoruros a las muestras.

Previo a la etapa experimental, se determinó la concentración de fluoruros, utilizando el medidor de fluoruros ExStick FL700 debidamente calibrado según el procedimiento de calibración y medición descrito en el anexo 5, procedimiento 1 y el procedimiento de estándares de fluoruro, ver anexo 5, procedimiento 3. El valor obtenido fue de 5.1 mg/L. Este valor corresponde al análisis al inicio de la época lluviosa. Cabe aclarar que previamente en el mes de febrero de 2016 se envió una muestra de agua al Laboratorio de Aguas de la Facultad de Química y Farmacia y se obtuvo un valor de 4.7 mg/L, ver anexo 2.

En la figura 3.1 se muestra el medidor utilizado para el análisis de fluoruros a las muestras de agua de pozo.



Figura 3.1. Medidor de fluoruros ExStick FL700

### 3.3 METODOLOGÍA PARA LA REMOCIÓN DE FLUORUROS

Para la remoción de fluoruros del agua de pozo se utilizó un sistema de tratamiento elaborado a nivel experimental, utilizando materiales económicos y de fácil adquisición, en donde el principal parámetro a evaluar fue la eficiencia del hueso bovino para remover fluoruros del agua. Para esto se experimentó tomando en cuenta dos metodologías: usando el hueso bovino molido y, también, hueso bovino molido y calcinado; para posteriormente, ser comparadas sus eficiencias al momento de reducir fluoruros, en la figura 3.2 se muestra un esquema de la metodología utilizada en la fase experimental.

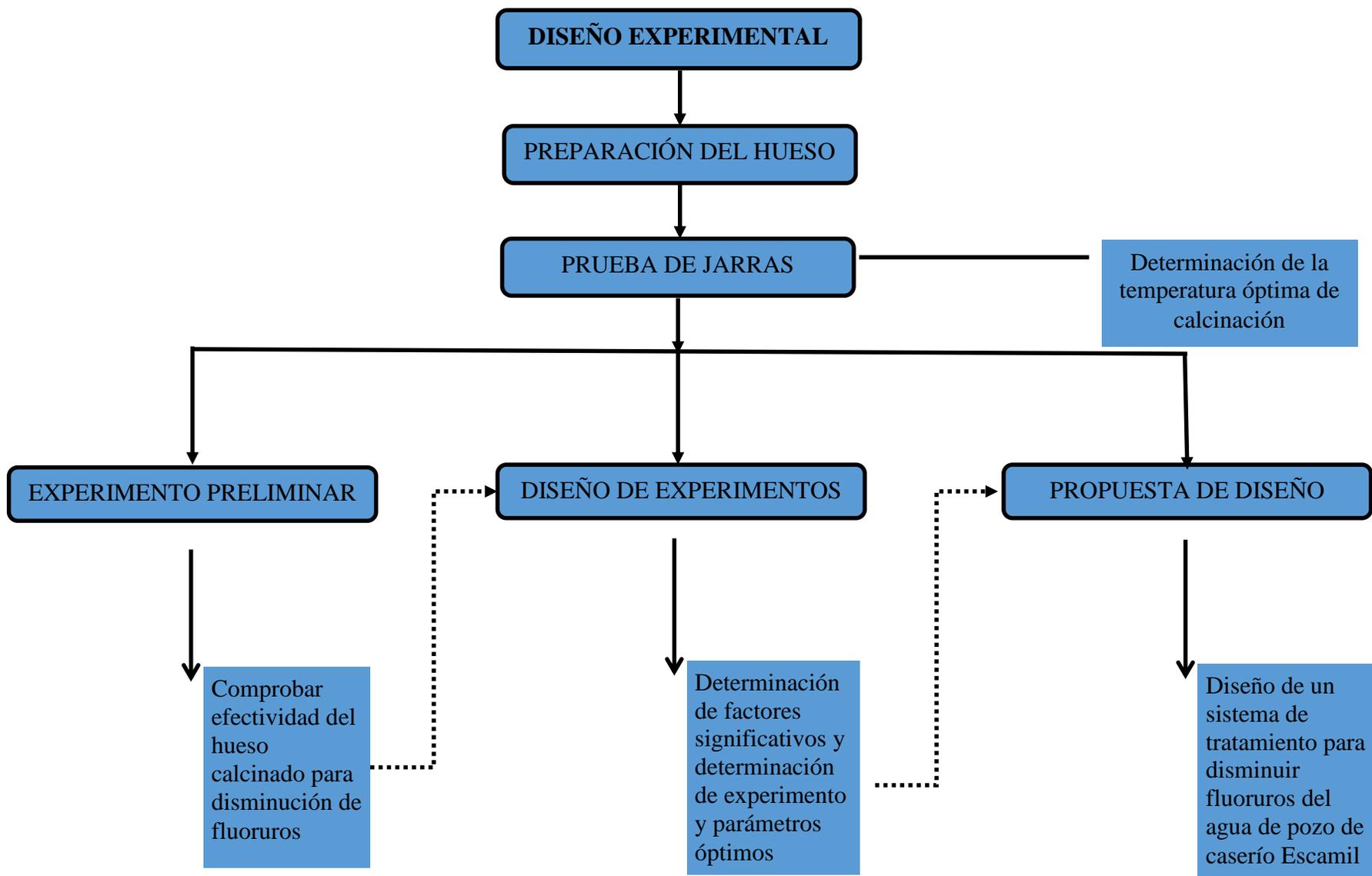


Figura 3.2. Esquema de la metodología utilizada en la fase experimental (elaboración propia)

### 3.3.1 Pruebas de efectividad de remoción de fluoruros

De acuerdo al estudio realizado por Valenzuela, Ramírez Hernández, Sol, y Reyes, en el 2010, la utilización del hueso permite obtener porcentajes de 43% con tiempo de retención de 5 minutos alcanzando el equilibrio 10 minutos con una remoción promedio de 45%. Además que recomienda que los tiempos de contacto no sean mayores a 60 minutos, por lo que se procederá a experimentar con tiempos comprendidos entre un intervalo de 5 a 75 minutos. Probando con los siguientes tiempos: 5, 15, 30, 45, 60 y 75 minutos

De acuerdo a lo mencionado en la bibliografía, la remoción de fluoruros con hueso bovino pulverizado calcinado y sin calcinar, tienen una gran efectividad para eliminar dicho componente, pero en su desarrollo se pueden observar tanto ventajas como desventajas. Por ejemplo, con el hueso bovino sin calcinar, el agua tratada presenta tanto un mal olor como un mal sabor pero es eficaz a la hora de remover fluoruros.

Con este procedimiento se evaluará la efectividad de remoción de fluoruros sin incluir las propiedades organolépticas, para ello, se evaluarán los dos métodos, hueso bovino molido y hueso bovino molido calcinado, se compararán y se seleccionará el que tenga mayor porcentaje de remoción de fluoruros, esto se calculará mediante la siguiente ecuación:

$$\text{efectividad de remoción} = \frac{\text{iones fluoruros iniciales} - \text{iones fluoruros finales}}{\text{iones fluoruro iniciales}} * 100$$

Con la aplicación de esta obtendrá, el porcentaje de remoción de iones fluoruros.

Se realiza una prueba de jarras para determinar cuál método es más efectivo para remover fluoruros de agua, ver procedimiento de pruebas de efectividad de remoción en el anexo 5, procedimiento 6.

Para la determinación de la temperatura de calcinación del hueso que presenta una mayor eficiencia, se realizó una prueba de jarras utilizando muestras de hueso obtenidas a distintas temperaturas, manteniendo constante el volumen, tiempo de agitación y la potencia de agitación. En la figura 3.3 se observan las muestras de hueso que fueron sometidas a prueba de jarras.



Figura 3.3. Muestras de 50 g hueso calcinado en beakers de 1 L

Las mediciones obtenidas para cada tiempo y cada temperatura se muestran a continuación en la tabla 3.2.

Tabla 3.2. Mediciones de concentración de fluoruros obtenidas a distintos tiempos para cada temperatura de calcinación del hueso.

<b>T° \ t(min)</b>	<b>0</b>	<b>5</b>	<b>15</b>	<b>30</b>	<b>45</b>	<b>60</b>	<b>75</b>
<b>450</b>	5.1	2.5	1.9	1.5	1	0.8	1
<b>500</b>	5.1	2.5	2.5	2.3	1.9	1.8	1.6
<b>550</b>	5.1	2.6	2.7	2.3	1.8	1.6	1.9
<b>600</b>	5.1	2.8	2.8	2.6	2.7	2.6	2.4
<b>650</b>	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1

Fuente: Elaboración propia

Posteriormente se calculó la eficiencia de reducción para cada muestra de hueso calcinado obteniéndose a partir del valor máximo removido registrado, ver tabla 3.3.

Tabla 3.3. Eficiencias de remoción de fluoruros máximas alcanzadas por el hueso calcinado a distintas temperaturas.

<b>T°</b>	<b>Concentración inicial</b>	<b>Concentración final</b>	<b>Eficiencia de Remoción (%)</b>
<b>450</b>	5.1	0.8	84.31
<b>500</b>	5.1	1.6	68.63
<b>550</b>	5.1	1.6	68.63
<b>600</b>	5.1	2.4	52.94
<b>650</b>	5.1	5.1	0

Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la tabla anterior el mejor resultado se obtiene con la muestra de hueso calcinado a una temperatura de 450 °C con una eficiencia máxima de remoción de 84.31%. Y también se puede observar que la eficiencia disminuye a medida aumenta la temperatura de calcinación, de tal manera que a 660 °C se pierden sus propiedades de intercambio iónico para reducir fluoruros.

Para determinar la eficiencia de remoción de fluoruros con el hueso desgrasado molido se realizó una prueba de jarras utilizando tres muestras como se muestra en la figura 3.4. La preparación del hueso desgrasado molido se puede ver en el anexo 5, procedimiento 4.



Figura 3.4. Realización de prueba de jarras a muestras de hueso molido sin calcinar

En la figura 3.5 se puede observar los resultados obtenidos para la concentración de fluoruros en agua de pozo tratada con hueso molido sin calcinar son notoriamente altos comparados con el agua tratada con hueso molido calcinado a la temperatura de 450° C.



Figura 3.5. Medición de fluoruros a muestras de hueso molido sin calcinar posterior a prueba de jarras.

A continuación, en la tabla 3.4, se muestran los resultados obtenidos en prueba de jarras para tres muestras de hueso molido sin calcinar.

Tabla 3.4. Resultados de medición de fluoruros posterior a prueba de jarras.

Muestra \ t(min)	0	5	15	30	45	60	75
1	5,1	4,4	4,3	3,9	3,7	3,5	3,5
2	5,1	4,7	4,6	4,4	4,3	3,9	3,7
3	5,1	4,4	4,4	4	3,7	3,6	3,5

Fuente: Elaboración propia

Se utilizaron los datos donde se obtuvo mayor reducción de fluoruros para cada muestra en el tiempo determinado para obtener la eficiencia de reducción, los cuales son mostrados en la tabla 3.5.

Tabla 3.5. Eficiencia de remoción de fluoruros de agua de pozo en muestras de hueso molido sin calcinar.

Muestra	Concentración inicial	Concentración final	Eficiencia de remoción (%)
1		3,5	31,37
2		3,7	27,45
3		3,5	31,37
<b>Promedio</b>			30.07

Fuente: Elaboración propia.

Luego de haber realizado la prueba de jarras con el hueso fresco molido se pudo observar que el agua tratada presentaba residuos grasos que le daban un aspecto blanquecino, el agua se presentaba notablemente turbia, con abundantes solidos flotando en ella, como se observa en la figura 3.6.



Figura 3.6. Muestra de agua de pozo tratada con hueso molido sin calcinar.

Se puede observar, además, que la eficiencia de remoción del hueso fresco molido sin calcinar es notablemente menor comparado con la eficiencia del hueso molido calcinado.

Para los procedimientos posteriores se utilizará el hueso calcinado a 450° C porque fue el que presentó mayor eficiencia de remoción de fluoruros.

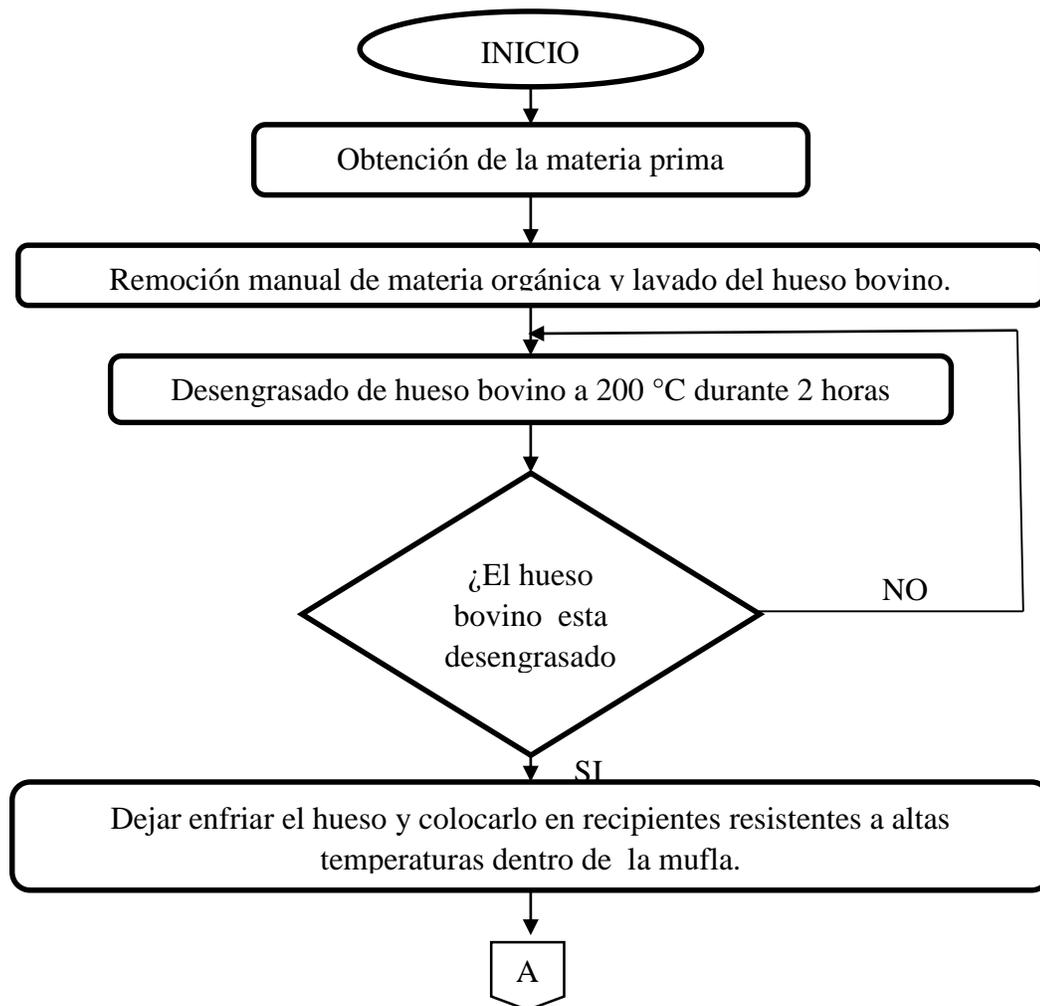
### 3.3.2 Prueba preliminar del sistema de remoción

Se realiza una prueba diseñando un sistema de tratamiento experimental preliminar, para ello se utiliza hueso bovino calcinado a 450° C para remoción de fluoruros como etapa principal, y dos etapas más para acondicionar el agua y mejorar la potabilidad del agua del pozo, utilizando componentes como arena silica y arena de río, componentes de filtros rápido usados normalmente para acondicionar aguas subterráneas.

### 3.3.2.1 Preparación del hueso

Se preparó el hueso a 450° C, puesto que este presentó mayor eficiencia para remoción de fluoruros comparado con las pruebas realizadas a las muestra de hueso calcinadas a otras temperaturas, y a la prueba realizada con el hueso molido sin calcinar. Para preparar el hueso a 450° C se siguió el procedimiento de preparación del hueso fresco a través de tratamiento térmico, ver anexo 5, procedimiento 5.

En la figura 3.7 se muestra un esquema del procedimiento a seguir para la preparación del hueso bovino calcinado.



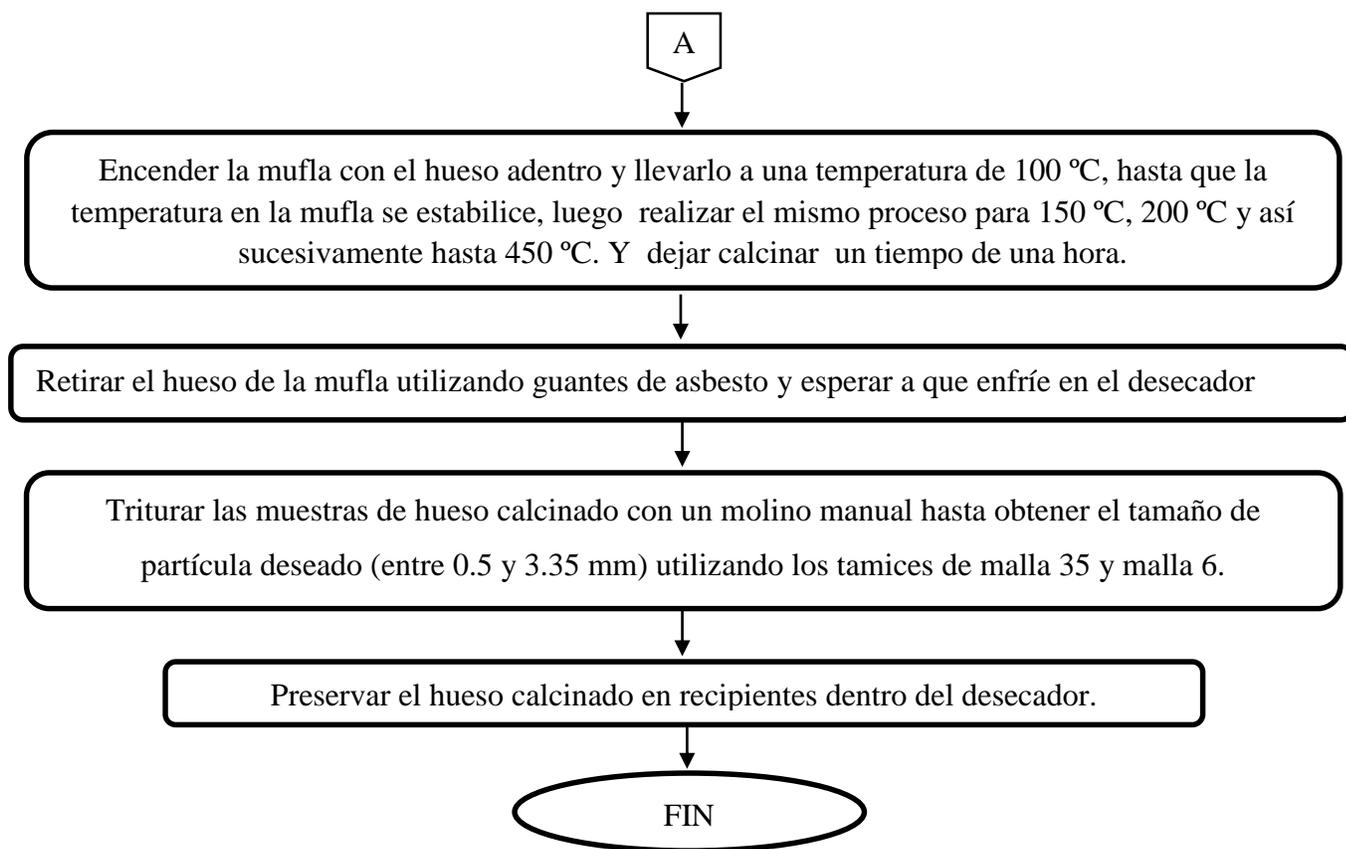


Figura 3.7. Esquema de preparación de hueso bovino calcinado (elaboración propia).

### **3.3.2.2 Elaboración del sistema de tratamiento preliminar**

Se elaboró un sistema de tratamiento con el objetivo de realizar una prueba preliminar, para posteriormente optimizarlo con un diseño experimental. Las fases de elaboración del sistema, utilizado en las pruebas preliminares, se pueden ver en el procedimiento de elaboración del sistema de remoción en el anexo 5, procedimiento 7. Este sistema se separó en tres etapas, descritas a continuación:

Primer recipiente (ver figura 3.8): Se agregó en la parte inferior una capa de 8 cm de altura y una superficie de  $51.53 \text{ cm}^2$  de piedra pómez como soporte, luego se le colocaron dos capas de algodón y en medio de estas una malla circular para separar las capas, seguido se colocó una capa de arena sílica de 6 cm de altura y una superficie de  $70.88 \text{ cm}^2$  y sobre esta una capa de 5 cm de altura de grava sílica con una superficie de  $78.54 \text{ cm}^2$ .



Figura 3.8. Primera etapa de sistema de tratamiento utilizado en prueba preliminar.

Segundo recipiente (ver figura 3.9): en el fondo se colocó una capa de grava de 3 cm de altura como soporte, luego se le colocaron dos capas de algodón y en medio de estas una malla circular para separar las capas, seguido de esto se colocó una columna de 15 cm de hueso calcinado que será el responsable de la remoción de fluoruros. Con un área superficial de  $78.54 \text{ cm}^2$ .



Figura 3.9. Segunda etapa de sistema de tratamiento utilizado en prueba preliminar.

Tercer recipiente (ver figura 3.10): en el fondo se colocó una capa de 6 cm de grava como soporte, con una superficie de  $56.75 \text{ cm}^2$ , sobre esta se colocó algodón para separar las capas, luego se colocó una capa de 8 cm de altura de carbón activado y  $60.62 \text{ cm}^2$  de superficie para mejorar la calidad del agua a la salida, luego se le colocaron dos capas de algodón y en medio de estas una malla circular para separar las capas y sobre esta una capa de 7 cm de altura de arena, con una superficie de  $78.54 \text{ cm}^2$ .



Figura 3.10. Tercera etapa de sistema de tratamiento utilizado en prueba preliminar.

### ***3.3.2.3 Procedimiento para determinar la reducción de fluoruros utilizando el sistema de tratamiento preliminar***

Se llenó el recipiente alimentador (figura 3.11) de capacidad de un galón con agua del pozo. Se determinó el caudal de entrada al sistema de tratamiento preliminar, obteniendo una medición de  $29.41 \text{ cm}^3/\text{s}$ .



Figura 3.11. Recipiente de alimentación de sistema de tratamiento preliminar.

Se dejó pasar el agua por el sistema de tratamiento (figura 3.12) y se recolectó en un recipiente toda el agua de salida. El tiempo que tardó un galón de agua en pasar por el sistema fue de 4 minutos y 35 segundos. Se observó que el agua a la salida del filtro mostraba un color amarillo oscuro.



Figura 3.12. Montaje de sistema de tratamiento preliminar

Se tomó una muestra a la salida del sistema de tratamiento de 20 ml con una pipeta volumétrica, como se muestra en la figura 3.13.



Figura 3.13. Toma de muestra a la salida del tratamiento preliminar.

Se midió la concentración de fluoruros en la muestra con el medidor ExStik FL700, obteniéndose una concentración de 1.4 mg/L, como se aprecia en la figura 3.14.



Figura 3.14. Medición de fluoruros de agua tratada.

Se repitió la prueba dos veces más en las cuales se obtuvieron los resultados de 1.3 mg/L y 1.4 mg/L, mostrados en la figura 3.15.



Figura 3.15. Medición de fluoruros de agua tratada.

Como el resultado no era el esperado se procedió a agregar más hueso calcinado al sistema de tratamiento para alcanzar una altura de 19 cm. La altura de la columna de hueso calcinado era de 15 cm. También se aumentó la columna de carbón activado hasta alcanzar una altura de 11 cm para contrarrestar el color amarillo observado en las primeras corridas.

Con la nueva altura de lecho de hueso calcinado, se repitió la prueba cuatro veces más en las cuales se obtuvieron los resultados de 1.1 mg/L, 1.0 mg/L, 1.1 mg/L y 1.0 mg/L respectivamente (figura 3.16) llegando así al valor esperado que contempla la Norma Salvadoreña, NSO 13.07.01:08 para agua potable de 1.0 mg/L.



Figura 3.16. Medición de fluoruros en muestras tratadas con el sistema preliminar.

Se realizó el mismo proceso repetidas veces hasta procesar 15 galones de agua del pozo, obteniéndose resultados similares, los cuales se muestran en la tabla 3.6.

Tabla 3.6. Resultados obtenidos en agua tratada con el sistema preliminar.

Nº	Volumen (gal)	Tiempo (min)	Tiempo acumulado (min)	Altura de la columna de hueso (cm)	Concentración de fluoruros	Color
1	1	4:35	4:35	15	1.4	Amarillo fuerte
2	1	4:40	9:15	15	1.3	Amarillo fuerte
3	1	4:37	13:52	15	1.4	Amarillo fuerte
4	1	4:37	18:29	19	1.1	Negro
5	1	4:35	23:04	19	1.0	Gris
6	1	4:36	27:40	19	1.1	Gris suave
7	1	4:37	32:17	19	1.0	Verde
8	1	4:42	36:59	19	1.1	Verde suave
9	1	4:40	41:39	19	1.1	Amarillo
10	1	4:36	46:15	19	1.2	Amarillo suave
11	1	4:33	50:48	19	1.0	Amarillo suave
12	1	4:37	55:25	19	1.0	Transparente
13	1	4:40	60:05	19	1.0	Transparente
14	1	4:38	64:43	19	1.1	Transparente
15	1	4:35	69:18	19	1.0	Transparente

Fuente: Elaboración propia

Se tomaron 4 muestras de 1 litro cada uno, las cuales se enviaron al laboratorio para realizar los análisis fisicoquímicos de: Color, conductividad, sulfatos, pH, solidos totales disueltos, turbiedad, dureza total, hierro total y nitratos. En la figura 3.17 se observa la toma de muestras de agua de pozo tratada para su posterior envío al laboratorio.



Figura 3.17. Toma de muestras de agua tratada para su posterior análisis de laboratorio.

### Resultados obtenidos de la prueba preliminar

En la tabla 3.7 se resumen los resultados obtenidos en los análisis de laboratorio realizados a las muestras de agua tratada de agua de pozo con el sistema preliminar. Estos exámenes se realizaron en el laboratorio fisicoquímico de aguas de la facultad de química y farmacia de la Universidad de El Salvador y en Ecochem S.A. de C.V, ver anexos 6 y 7.

Tabla 3.7. Resultados obtenidos en las muestras de agua tratada en la prueba preliminar

<b>Parámetro</b>	<b>Valor medido en el agua tratada en la prueba preliminar</b>	<b>Límite máximo permisible según NSO 13.07.02:08</b>
<b>pH</b>	8.0	8.5
<b>Turbidez</b>	1.34 NTU	5 NTU
<b>Conductividad</b>	691.4 $\mu\text{s/cm}$	
<b>Sólidos totales disueltos</b>	345 mg/L	1000 mg/L
<b>Color</b>	24.8 Pt-Co	15 Pt-Co
<b>Sulfatos</b>	145 mg/L	400.0 mg/L
<b>Nitratos</b>	No detectado	45 mg/L
<b>Dureza</b>	50 mg/L	500 mg/L
<b>Fluoruros</b>	1.0 mg/L	1 mg/L

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar los resultados, de la prueba preliminar, muestran que los valores de todos los parámetros, excepto el color, cumplen con los requerimientos de la norma salvadoreña NSO 13.07.02:08. El color muestra un valor de 24.8 Pt-Co, cuando el máximo permisible es de 15 Pt-Co.

### 3.4 DISEÑO FACTORIAL DEL TIPO $2^k$

La experimentación del laboratorio para determinar las condiciones de funcionamiento del sistema de tratamiento de agua para reducción de fluoruros se planificó con un diseño de experimentos del tipo  $2^k$  a dos niveles, para determinar la relación de la concentración de fluoruros a la salida del sistema de tratamiento y los diferentes factores que intervienen para obtener una concentración final menor a 1 mg/L de fluoruros en el agua a tratar. Se evaluará la variación obtenida en el factor respuesta siendo este la concentración de fluoruros a la salida del

sistema y los efectos principales: Recirculación, altura del lecho, concentración inicial de fluoruros y el caudal. Los factores para los niveles máximos (+) y mínimo (-) se detallan en la tabla 3.8.

Tabla 3.8. Valores máximos y mínimos asignados a las variables para diseño experimental.

Variable	Valor mínimo (-)	Valor máximo (+)
Concentración de fluoruros	4.7 mg/L	17.5 mg/L
Caudal	514.2 mL/min	1000.8 mL/min
Altura	11 cm	23 cm
Recirculación	No	Si

Fuente: Elaboración propia.

La concentración de fluoruros representa el mínimo y máximo valor registrados en los resultados de concentración de fluoruros obtenidos en el agua del pozo del caserío Escamil, siendo el menor valor 4.7 (ver anexo 2) y el mayor valor encontrado por el Centro de Calidad Industrial de 17.5 (ver anexo 8). El caudal es el mínimo y máximo constante alcanzados por una bomba de 5 watts, y de 50 cm de cabeza de presión, ver figura 3.18. Los valores máximo y mínimo de la altura han sido considerados a partir de los resultados obtenidos con las alturas utilizadas en las pruebas experimentales previas. Y la variable recirculación no es de carácter cuantitativa, será representado como valor máximo la utilización de un proceso de recirculación y como mínimo el no utilizar recirculación.



Figura. 3.18. Bomba sumergible de 5 watts, y de 50 cm de cabeza de presión

El experimento es de tipo  $2^4$ . Utilizando la tabla de orden de Yates de experimentos  $2^K$ , que se presenta en la figura 3.19, donde se muestra la combinación de variables a realizar en cada uno de los experimentos.

	<u>No.</u>	<u>X<sub>1</sub></u>	<u>X<sub>2</sub></u>	<u>X<sub>3</sub></u>	<u>X<sub>4</sub></u>	<u>X<sub>5</sub></u>
<b>k = 1</b>	1	-	-	-	-	-
	2	+	-	-	-	-
<b>k = 2</b>	3	-	+	-	-	-
	4	+	+	-	-	-
<b>k = 3</b>	5	-	-	+	-	-
	6	+	-	+	-	-
	7	-	+	+	-	-
	8	+	+	+	-	-
	9	-	-	-	+	-
	10	+	-	-	+	-
	11	-	+	-	+	-
	12	+	+	-	+	-
	13	-	-	+	+	-
	14	+	-	+	+	-
<b>k = 4</b>	15	-	+	+	+	-
	16	+	+	+	+	-
	17	-	-	-	-	+
	18	+	-	-	-	+
	19	-	+	-	-	+
	20	+	+	-	-	+
	21	-	-	+	-	+
	22	+	-	+	-	+
	23	-	+	+	-	+
	24	+	+	+	-	+
	25	-	-	-	+	+
	26	+	-	-	+	+
	27	-	+	-	+	+
	28	+	+	-	+	+
	29	-	-	+	+	+
	30	+	-	+	+	+
<b>k = 5</b>	31	-	+	+	+	+
	32	+	+	+	+	+

Figura 3.19. Tabla de Yates para realización de experimentos del modelo  $2^K$

### 3.4.1 Procedimiento experimental para la determinación de significancia de los efectos en la variable respuesta.

a) Desarrollo inicial:

- Se prepararon ocho galones de solución de fluoruro de sodio, cuatro galones a una concentración de 4 ppm y cuatro galones a una concentración de 17.5 ppm.
- Se midió la altura de la columna de hueso calcinado para la primera tanda de pruebas.
- Se utilizó una bomba sumergible con una cabeza de presión de 50 cm con una rejilla de regulación del caudal, usando se a su máximo y mínimo dependiendo el experimento a realizar. En la figura 3.20, se muestra el montaje experimental utilizado.



Figura 3.20. Montaje para realización de experimentos variando factores.

b) Se colocó medio galón de solución de fluoruro de sodio ya sea de 4.7 ppm o de 17.5 ppm en el balde de acuerdo al experimento a realizar, como se muestra en la figura 3.21.



Figura 3.21. Alimentación de solución de fluoruros a sistema experimental.

c) Se hizo pasar la solución por la columna de carbón de hueso calcinado variando la altura ya sea 11 cm o 23 cm según el experimento a realizar, utilizando la bomba ajustando el caudal a 514.2 mL/min o 1000.8 mL/min. El montaje se muestra en la figura 3.22.



Figura 3.22. Circulación de agua fluorada por columna de 11 cm de hueso calcinado.

d) Se recolectó la solución de fluoruro de sodio luego de pasar por la columna de carbón de hueso para tomar una alícuota y realizar la medición de fluoruro. Un ejemplo se muestra en la figura 3.23.



Figura 3.23. Ejemplo de medición de fluoruros de agua tratada.

e) Para los experimento en lo que se requería de recirculación y mismas condiciones se hizo pasar de nuevo el agua recolectada y posteriormente se realizó el análisis de concentración de fluoruros. Un ejemplo de medición se muestra en la figura 3.24.



Figura 3.24. Medición de fluoruros en agua tratada con recirculación.

f) Se repitió cada experimento siguiendo la tabla de orden de Yates, mostrada en la figura 3.16, hasta completar los 16 experimentos del modelo  $2^4$ .

### 3.4.2 Resultados obtenidos en el procedimiento experimental para la determinación de significancia de los efectos en la variable respuesta.

Se tabularon los resultados de concentración de fluoruros obtenidas de los 16 experimentos, y el porcentaje de reducción de este parámetro, de manera aleatoria para su posterior análisis de significancia utilizando la herramienta STATGRAPHICS, obteniéndose para la variable respuesta, que para nuestro caso es el porcentaje de remoción de fluoruros, los resultados que se muestran en la tabla 3.9.

Tabla 3.9. Secuencia de experimentos para diseño  $2^k$  con los respectivos resultados alcanzados.

Prueba	Recirculación	Caudal	Concentración	Altura	Resultado (mg/L)	% de remoción
<b>1</b>	+	-	-	-	0.8	82.98
<b>2</b>	-	+	-	-	1.2	74.47
<b>3</b>	<b>+</b>	<b>-</b>	<b>+</b>	<b>+</b>	<b>0.6</b>	<b>96.57</b>
<b>4</b>	+	-	-	+	0.6	87.23
<b>5</b>	-	-	-	-	2.3	51.06
<b>6</b>	+	+	+	-	2.4	86.29
<b>7</b>	+	+	-	-	0.7	85.11
<b>8</b>	-	-	+	+	0.9	94.86
<b>9</b>	-	-	-	+	0.7	85.11
<b>10</b>	+	+	-	+	0.5	89.36
<b>11</b>	-	+	-	+	0.8	82.98
<b>12</b>	-	-	+	-	4.6	73.71
<b>13</b>	+	-	+	-	1.6	90.86
<b>14</b>	-	+	+	-	4.2	76.00
<b>15</b>	+	+	+	+	1.0	94.29
<b>16</b>	-	+	+	+	2.2	87.43

Fuente: Elaboración propia.

Analizando los resultados mediante la utilización de la herramienta STATGRAPHICS los efectos de los factores se obtuvieron las estimaciones mostradas en la tabla 3.10.

Tabla 3.10. Efectos estimados de los factores para reducción de fluoruros.

Efecto	Estimado	Error estándar	V.I.F
<b>Promedio</b>	83.6444	1.36535	
<b>A: Recirculación</b>	10.8837	2.73071	1.0
<b>B: Caudal</b>	1.69375	2.73071	1.0
<b>C: Concentración</b>	7.71375	2.73071	1.0
<b>D: Altura</b>	12.1688	2.73071	1.0
<b>AB</b>	-2.34125	2.73071	1.0
<b>AC</b>	-1.88125	2.73071	1.0
<b>AD</b>	-6.61625	2.73071	1.0
<b>BC</b>	-4.12125	2.73071	1.0
<b>BD</b>	-4.12125	2.73071	1.0
<b>CD</b>	-0.59625	2.73071	1.0

Errores estándar basados en el error total con 5 g.l.

Fuente: Elaboración propia

Con los datos de estimación de los efectos de cada factor o de la combinación de los factores se construye el diagrama de Pareto, figura 3.25, el cual muestra la priorización de efectos significativos y no significativos de las variables analizadas.

Diagrama de Pareto estandarizada para reducción de fluoruros

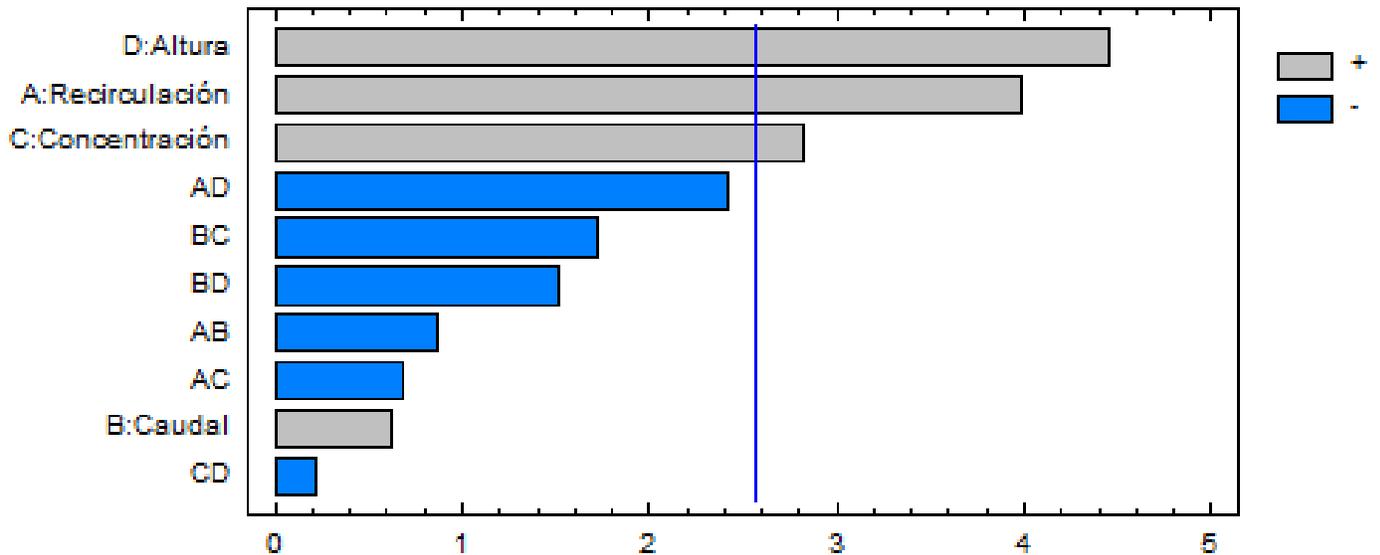


Figura 3.25. Diagrama de Pareto estandarizado para determinación de efectos significativos para reducción de fluoruros (elaboración propia)

Al observar el diagrama se puede identificar tres efectos significativos al 5% de significancia, dichos efectos son: La altura, la recirculación y la concentración. Mostrando los tres una tendencia al mayor valor para optimizar la variable de porcentaje de remoción de fluoruros.

Al realizar un análisis de varianza mostrado en la tabla 3.11 se puede observar de manera cuantitativa que efectivamente estos tres factores son significativos.

Tabla 3.11. Análisis de varianza para reducción de fluoruros.

Fuente	Suma de cuadrados	G.l.	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
<b>A: Recirculación</b>	473.824	1	473.824	15.89	0.0105
<b>B: Caudal</b>	11.4752	1	11.4752	0.38	0.5623
<b>C: Concentración</b>	238.008	1	238.008	7.98	0.0369
<b>D: Altura</b>	592.314	1	592.314	19.86	0.0067
<b>AB</b>	21.9258	1	21.9258	0.74	0.4304
<b>AC</b>	14.1564	1	14.1564	0.47	0.5215
<b>AD</b>	175.099	1	175.099	5.87	0.0599
<b>BC</b>	88.0313	1	88.0313	2.95	0.1464
<b>BD</b>	67.9388	1	67.9388	2.28	0.1916
<b>CD</b>	1.42206	1	1.42206	0.05	0.8358
<b>Error total</b>	149.135	5	29.8271		
<b>Total (corr.)</b>	1833.33	15			

R-cuadrada = 91.8653 %

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 75.596 %

Error estándar del est. = 5.46142

Fuente: Elaboración propia

Con la gráfica 3.26 se puede analizar el comportamiento del efecto de estos tres factores significativos. Además, se puede ver la no significancia del factor caudal, que no tiene una tendencia pronunciada ni hacia un valor máximo ni mínimo, por lo que no se incluye como un factor significativo en este diseño experimental.

Gráfica de efectos principales para reducción de fluoruros

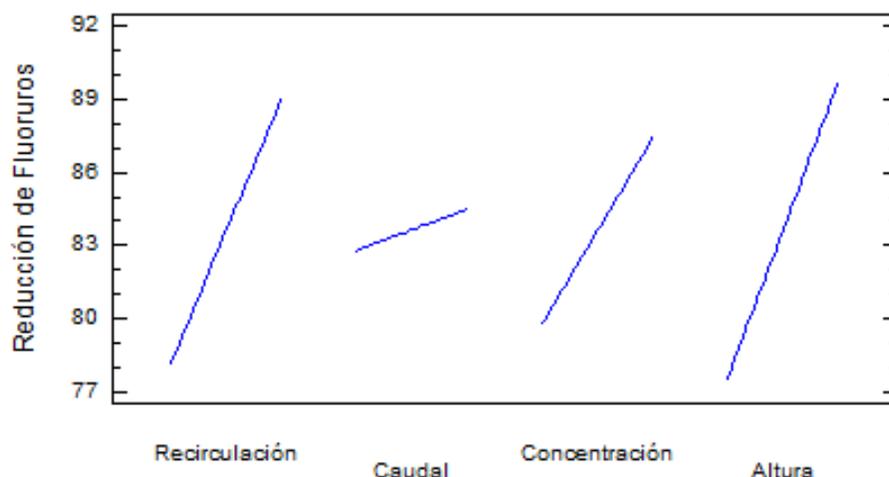


Figura 3.26. Gráfica de efectos principales para reducción de fluoruros (elaboración propia).

En la figura 3.26 se puede observar que el efecto de la recirculación sobre la reducción de fluoruros es mayor al tender hacia su máximo es decir que “si (+)” hay recirculación. También se puede observar que una mayor altura favorecerá una mayor reducción de fluoruros. Y que, el sistema será efectivo también a concentraciones altas de fluoruros en el agua.

### 3.5 OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA DE REMOCIÓN DE FLÚOR

Utilizando la herramienta de STATGRAPHICS se procedió a realizar un experimento de optimización como se muestra en las tablas 3.12 y 3.13.

Tablas 3.12 Deseabilidad de los factores para optimizar la remoción de fluoruros.

	Mínimo	Máximo
<b>Respuesta</b>	Observado	Observado
<b>Reducción de fluoruros</b>	51.06	96.57

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.13. Determinación de los factores óptimos para remoción de fluoruros.

	Deseabilidad	Deseabilidad		Pesos	Pesos	
<b>Respuesta</b>	Baja	Alta	Meta	Primero	Segundo	Impacto
<b>Reducción de fluoruros</b>	51.06	96.57	Maximizar	1.0	N/A	3.0

Fuente: Elaboración propia

Este procedimiento ayuda a determinar la combinación de los factores experimentales que simultáneamente optimiza varias respuestas. Los hace maximizando la función de ‘deseabilidad’. Las metas de cada una de las respuestas actualmente están establecidas como: Reducción de Fluoruros – maximizar.

Con la ayuda de la herramienta STATGRAPHICS, se pudo determinar las condiciones del experimento óptimo, que nos garanticen la mayor eficiencia en la remoción de fluoruros, la tabla 3.14, muestra los resultados obtenidos con esta herramienta.

Tabla 3.14. Determinación del experimento óptimo.

		<b>Deseabilidad</b>	<b>Deseabilidad</b>
<b>Fila</b>	Reducción de fluoruros	Prevista	Observada
<b>1</b>	82.98	0.614219	0.701384
<b>2</b>	74.47	0.419207	0.514392
<b>3</b>	96.57	1.0	1.0
<b>4</b>	87.23	0.839884	0.79477
<b>5</b>	51.06	0.136907	0.0
<b>6</b>	86.29	0.831809	0.774116
<b>7</b>	85.11	0.793631	0.748187
<b>8</b>	94.86	0.954145	0.962426
<b>9</b>	85.11	0.653332	0.748187
<b>10</b>	89.36	0.838181	0.841573
<b>11</b>	82.98	0.754518	0.701384
<b>12</b>	73.71	0.463923	0.497693
<b>13</b>	90.86	0.858561	0.874533
<b>14</b>	76.0	0.54006	0.548011
<b>15</b>	94.29	0.850157	0.949901
<b>16</b>	87.43	0.849168	0.79915

Fuente: Elaboración propia

La salida muestra la función de ‘deseabilidad’ evaluada en cada punto del diseño. Entre los puntos de diseño, la ‘deseabilidad’ máxima se alcanza en la corrida 3, la cual se puede apreciar en la tabla 3.15, la cual muestra un segmento de la tabla 3.9 secuencia de experimentos para diseño  $2^k$  con los respectivos resultados alcanzados.

Tabla 3.15. Segmento de la tabla 3.9 (secuencia de experimentos para diseño  $2^k$  con los respectivos resultados alcanzados).

Prueba	Recirculación	Caudal	Concentración	Altura	Resultado (mg/L)	% de remoción
<b>1</b>	+	-	-	-	0,8	82,98
<b>2</b>	-	+	-	-	1,2	74,47
<b>3</b>	+	-	+	+	0,6	96,57

Fuente: Elaboración propia.

La tercer corrida muestra las condiciones óptimas para la realización del experimento, las cuales son: recirculación en su valor máximo, es decir, que si debe haber recirculación; la altura en su nivel más alto, es decir, 23 cm; concentración en su valor más alto, es decir, 17.5 mg/L, pero este valor será variante, dependiendo de las condiciones en las que se encuentre el agua del pozo; y el caudal aparece señalado en su nivel más bajo, sin embargo este factor no es significativo para la realización de este experimento.

### 3.6 EXPERIMENTO ÓPTIMO

A partir del análisis realizado en el diseño experimental, se procedió a elaborar el experimento en las condiciones óptimas para someter a prueba una muestra de agua de pozo del caserío Escamil y evaluar la eficiencia del tratamiento realizado con el sistema operando en condiciones óptimas.

#### 3.6.1 Montaje experimental

Primer recipiente (ver figura 3.27): en el fondo se colocó una capa de grava de 2.5 cm de altura como soporte, sobre esta se colocó un tubo de acrílico con un dispersor en el fondo, y dentro de este una malla circular para retener el hueso molido calcinado, seguido de esto se colocó una columna de 23 cm de hueso calcinado que será el responsable de la remoción de fluoruros. Con un diámetro de 8 cm.



Figura 3.27. Primera etapa de sistema de tratamiento experimental óptimo.

Segundo recipiente (ver figura 3.28): en el fondo se colocó una capa de grava de 2.5 cm de altura como soporte, sobre esta se colocó un tubo de acrílico con un dispersor en el fondo, y dentro de este una malla circular para retener la arena de río, seguido se colocó una capa de arena de río de 9 cm de longitud y 8 cm de diámetro, posteriormente una malla de hilo nylon para separar las capas, y sobre esta una capa de arena sílica de 9 cm de altura y un diámetro de 8 cm.



Figura 3.28. Segunda etapa de sistema de tratamiento experimental óptimo.

Tercer recipiente (ver figura 3.29): en el fondo se colocó una capa de grava de 2.5 cm de altura como soporte, sobre esta se colocó un tubo deacrílico con un dispersor en el fondo, y dentro de este una malla circular para retener, luego se colocó dentro del tuboacrílico una capa de 7 cm de altura de piedra pómez, luego una malla de hilo nylon como separación entre capas, y sobre está una capa de 11 cm de longitud de carbón activado mejorar la calidad del agua a la salida, estas capas se colocaron dentro del tuboacrílico de 8 cm de diámetro.



Figura 3.29. Tercera etapa de sistema tratamiento experimental óptimo.

En la figura 3.30 se muestra el montaje completo que se utilizó para realizar el experimento en condiciones óptimas para el tratamiento del agua de pozo.



Figura 3.30. Montaje experimental de sistema de tratamiento con las condiciones óptimas.

### 3.6.2 Procedimiento para determinar la reducción de fluoruros utilizando el sistema de tratamiento preliminar.

Se obtuvieron 3 muestras de 1 galón de agua de pozo del caserío Escamil, para reproducir el experimento por triplicado, siguiendo el método estándar para toma de muestras.

De cada galón de agua de pozo se tomó una alícuota de 20 mL y se procedió a determinar la concentración de fluoruros con el medidor ExStick FL700, obteniendo en las 3 mediciones un valor de 5.2 mg/L, como se muestra en la figura 3.31.



Figura 3.31. Medición de concentración de fluoruros para muestra de agua de pozo, previo a experimento óptimo.

Se llenó el recipiente alimentador con un galón de agua de pozo. Y se introdujo en este una bomba de 5 watts (figura 3.32), para garantizar el caudal en sus condición mínima, de 514.2 mL/min, como lo propone la corrida 3, no siendo este un factor significativo en los resultados esperados de este experimento.



Figura 3.32. Recipiente de alimentación de sistema de tratamiento óptimo con bomba de 5 watts.

Se dejó pasar el agua por el sistema de tratamiento y se recolectó en un recipiente de 1 galón nuevo el agua de salida. Como se muestra en la figura 3.33.



Figura 3.33. Corrida de experimento óptimo.

Se recolectó el agua tratada en recipiente de polietileno 2 de capacidad de un galón, utilizando un embudo de plástico como se muestra en la figura 3.34.



Figura 3.34. Recolección de agua tratada

Se tomaron 3 muestras de 20 mL de agua tratada para su posterior análisis de fluoruros con el medidor ExStik FL700, obteniendo un resultado de 0.5 mg/L como se muestra en la figura 3.35.



Figura 3.35. Medición de fluoruros de agua tratada.

En la prueba experimental con los parámetros en sus valores óptimos se obtuvo un porcentaje de remoción de 90.38 %.

Del galón de agua tratada que se recolectó se tomaron muestras de 500 mL para su caracterización fisicoquímica en el laboratorio de aguas de la facultad de química y farmacia de la Universidad de El Salvador y de Ecochem S.A. de C.V (ver anexos 9 y 10). Obteniendo los resultados que se resumen en la tabla 3.16.

Tabla 3.16. Resultados obtenidos en las muestras de agua tratada en la prueba final

<b>Parámetro</b>	<b>Valor medido en el agua tratada en el experimento</b>	<b>Límite máximo permisible según NSO 13.07.02:08</b>
<b>pH</b>	7.8	8.5
<b>Turbidez</b>	0.33 NTU	5 NTU
<b>Conductividad</b>	658. $\mu\text{s}/\text{cm}$	
<b>Sólidos totales disueltos</b>	345 mg/L	1000 mg/L
<b>Color</b>	No detectado	15 Pt-Co
<b>Sulfatos</b>	151 mg/L	400.0 mg/L
<b>Nitratos</b>	No detectado	45 mg/L
<b>Dureza</b>	30 mg/L	500 mg/L
<b>Fluoruros</b>	0.5 mg/L	1 mg/L

Fuente: elaboración propia

Se puede observar que el agua de pozo del caserío Escamil, posteriormente al tratamiento con el sistema experimental utilizando hueso molido calcinado, en condiciones óptimas, cumple con los valores permitidos por la normativa salvadoreña.

#### **CAPÍTULO 4. DISEÑO DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO PARA DISMINUIR FLUORUROS DE AGUA DE POZO**

A partir de la etapa experimental se plantea una propuesta de diseño de equipo para tratamiento de agua de pozo para reducción de fluoruros de agua de pozo del caserío Escamil, cantón Santa Rosa, Agua Caliente, Chalatenango.

Se realizó una etapa experimental preliminar para comprobar la eficiencia del hueso bovino para remover fluoruros de agua por intercambio iónico entre la hidroxiapatita y el flúor. La materia inorgánica del hueso está constituida principalmente por cristales submicroscópicos de

hidroxiapatita (HaP), de fórmula general  $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ , depositada en forma de agujas delgadas. Por lo cual, el hueso molido es un elemento con capacidad para retener el ión  $\text{F}^-$  contenido en aguas naturales.

En la etapa experimental preliminar, se propuso un sistema de tratamiento de tres etapas que contenían, en la primera etapa, una capa de grava sílica y otra de arena sílica fina como pretratamiento para disminuir sólidos y dureza contenida en esta además de compuestos orgánicos y microbiológicos, posteriormente, una segunda etapa conteniendo hueso molido de res calcinado a  $450\text{ }^\circ\text{C}$  como intercambiador iónico para remoción de fluoruros y una tercera etapa conteniendo principalmente carbón activado, mediante prueba de jarras se determinó la temperatura óptima de preparación del hueso para remover fluoruros. A partir de la prueba preliminar, se obtuvieron resultados positivos, logrando una reducción de hasta un 80.39 %, lo cual representa que se alcanzó un valor en la concentración de fluoruros de 1 mg/L de una muestra que, inicialmente, contenía 5.1 mg/L. La Norma Salvadoreña, NSO 13.07.01:08 para agua potable establece para los fluoruros un valor de 1.0 mg/L, por lo que, esta prueba no era garantía de que la norma se cumplirá con el tiempo, principalmente, cuando se ha observado que la concentración de fluoruros en el agua de pozo del caserío Escamil, varía según transcurre la estación lluviosa o seca del año. Por lo que se procedió a plantear un diseño experimental, para posteriormente optimizar el experimento y encontrar los valores óptimos de los factores que afectan el tratamiento del agua de pozo para la reducción de fluoruros.

El diseño experimental realizado consistió en un modelo  $2^4$  a dos niveles, es decir cuatro factores, los cuales eran recirculación, caudal, concentración de fluoruros y altura de la columna del hueso, con valores máximos y mínimos, para determinar su significancia en el tratamiento del agua en la etapa de remoción de fluoruros utilizando hueso molido de res.

Se realizaron 16 corridas experimentales, combinando los valores máximos y mínimos para cada factor, utilizando la tabla de Yates que se muestra en la figura 3.19. Posteriormente, se analizaron los resultados obtenidos utilizando la herramienta Statgraphics, determinando que los factores significativos son altura de la columna del hueso, recirculación y concentración de fluoruros en el agua, los cuales tienden a su valor máximo.

El experimento de optimización, realizado con la misma herramienta, Statgraphics, mostró que los valores, para alcanzar una mayor remoción de fluoruros en el agua de pozo del caserío Escamil, son una altura en su valor máximo de 23 cm; concentración en su valor más alto, es decir, 17.5 mg/L, pero este valor será variante, dependiendo de las condiciones en las que se encuentre el agua del pozo y recirculación en su valor máximo, es decir, que sí debe haber recirculación.

Se procedió a reproducir los valores óptimos experimentalmente, utilizando un sistema de tratamiento con modificaciones respecto al sistema preliminar, para mejorar la calidad del agua obtenida, alcanzando una efectividad de remoción de 90.38 %, se logró obtener una concentración de fluoruros de 0.5 mg/L, de muestras de agua que inicialmente contenían una concentración de 5.2 mg/L.

El sistema utilizado se configuró con tres etapas. En la primera etapa se colocó la columna de hueso molido, calcinado a 450° C, para posteriormente pasar por una etapa de arena sílica más arena de río, para propiciar la purificación al agua posterior al contacto con el hueso, y finalmente una capa de 11 cm de altura de carbón activado que ayuda a eliminar color, olor y sabor al agua tratada.

#### **4.1 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE TRATAMIENTO EXPERIMENTAL**

A partir de los resultados obtenidos en el desarrollo experimental se procedió a montar el sistema, con las condiciones óptimas de los factores significativos para la remoción de fluoruros, además se mejoró el diseño de los complementos para garantizar una mejor calidad del agua. Cada una de las etapas del sistema de tratamiento montado se describe a continuación.

El proceso de remoción de fluoruros del agua se desarrolla en tres etapas:

➤ **Etapas 1:**

En esta fase se hace pasar el agua por una columna de carbón de hueso bovino calcinado, este es la etapa principal de todo el proceso, ya que acá se elimina por adsorción la mayor parte de los iones de fluoruro presentes en el agua, tal como se demostró en el capítulo tres al aumentar la altura de la columna de carbón de hueso bovino calcinado se obtienen mejores resultados o hacer una recirculación para obtener una mayor adsorción de fluoruros.

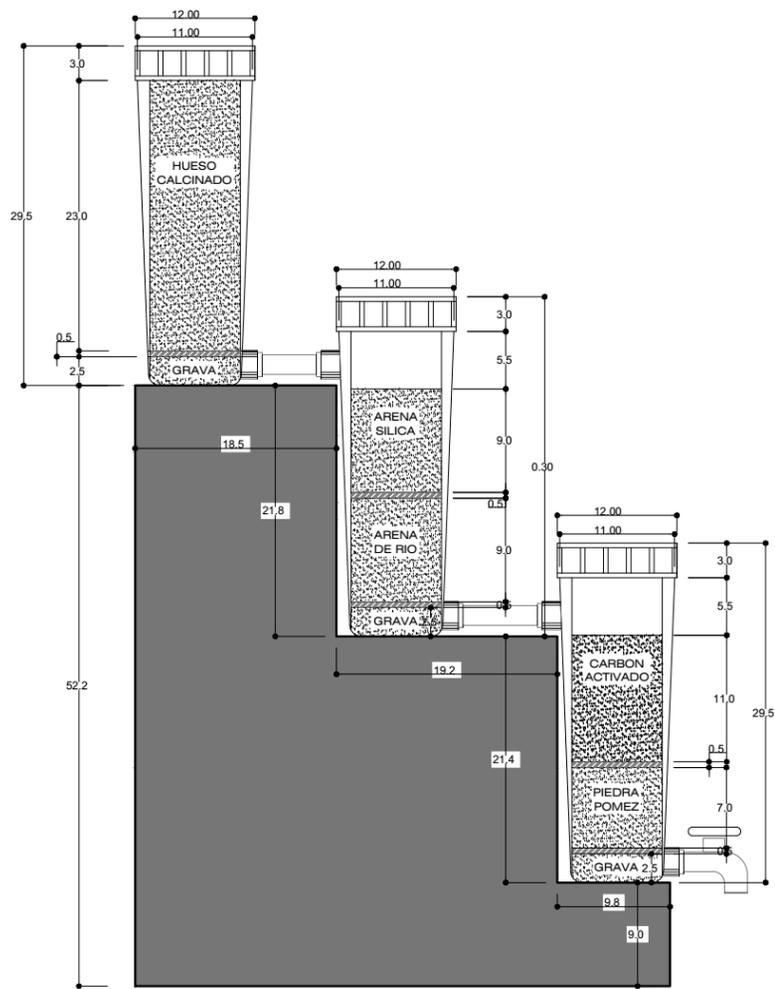
➤ Etapa 2:

El agua proveniente de la etapa anterior pasa por una columna de arena y piedra silica con la finalidad de retener partículas e impurezas que lleve el agua, en esta fase la remoción de fluoruros es nula,

➤ Etapa 3:

Esta es la fase final acá se hace pasar el agua proveniente de las etapas previas por una columna de carbón activado y piedra pómez, la principal función del carbón activado es la eliminación de color, sabor y olor, además como parte de sus propiedades como material adsorbente también remueve fluoruros aunque en menor proporción comparándolo con el hueso bovino calcinado, la piedra pómez sirve como material filtrante y para remover olor del agua.

En la figura 4.1 se muestra los planos del montaje experimental utilizado para la realización del experimento óptimo.



SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUA PARA DISMINUIR FLUORUROS A NIVEL EXPERIMENTAL



PROYECTO: "PROPUESTA DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO PARA DISMINUIR FLUORUROS DEL AGUA DEL POZO DE CASERIO ESCAMIL, CANTON SANTA ROSA, AGUA CALIENTE, CHALATENANGO"

PRESENTA:  
BENITEZ CAÑAS, JULIO JOSE  
PACHECO GONZALEZ, LUIS EDUARDO  
SANDOVAL BLANCO, CARLOS ADALBERTO

CONTENIDO 1:  
SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUA PARA DISMINUIR FLUORUROS A NIVEL EXPERIMENTAL

ESCALA: 1:1.5	FECHA: DICIEMBRE 2016	HOJA: 1/1
UNIDADES: cm		

Figura 4.1. Planos del sistema de tratamiento de aguas para disminuir fluoruros a nivel experimental.

## 4.2 MEJORAS PROPUESTAS AL SISTEMA EXPERIMENTAL

Se propone realizar mejoras al diseño experimental, para mejorar su funcionamiento, y tener así un diseño de tratamiento de agua de pozo del caserío Escamil a nivel casero. En la tabla 4.1 se resumen las mejoras a realizar al diseño experimental para ser tomados en cuenta en la propuesta.

Tabla 4.1. Propuesta de mejoras a sistema de tratamiento.

MEJORAS	DISEÑO EXPERIMENTAL	DESVENTAJAS	PROPUESTA
<p><b>Contenedores del sistema.</b></p>	 <p>Características: Color transparente. Recipiente de diámetro irregular, desde 8 cm en el fondo hasta 11 cm en la parte superior. Altura de 29.5 cm. Con tapadera de rosca.</p>	<p>Es necesario introducir en el recipiente tubos deacrílico con el diámetro fijo deseado. Difícil manipulación de los componentes utilizados.</p>	 <p>Características: Color transparente. Diámetro regular de 5 cm. Altura de 25.4 cm. Tapadera de rosca.</p>
<p><b>Tamices de retención de sólidos</b></p>	<p>Características: Elaborados con mayas de hilo nylon de 5 mm diámetro</p>	<p>No garantiza la retención del 100 % de los sólidos utilizados para el tratamiento del aguas.</p>	 <p>Características: Malla fina. Retenedor de sólidos.</p>

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.1. Propuesta de mejoras a sistema de tratamiento (continuación).

MEJORAS	DISEÑO EXPERIMENTAL	DESVENTAJAS	PROPUESTA
<p><b>Montaje del sistema de tratamiento</b></p>	 <p>Características: Flujo de agua por gravedad. Base de madera de tres gradas como soporte. Tuberías para paso de agua dispuestas horizontalmente.</p>	<p>Utiliza bastante espacio. Firmeza inestable. Base de madera que se deteriora con el agua.</p>	 <p>Características: Flujo de agua ascendente y descendente por presión ejercida por el grifo. Fácil instalación en cocina, pared o tabla. Utilización de codos para paso de agua, proporcionando ahorro de espacio</p>
<p><b>Mufla</b></p>	 <p>Características: sistema cerrado con temperatura máxima de 900 °C con revestimiento de asbesto</p>	<p>En los resultados obtenidos se puede presenciar un leve olor a calcinado debido al equipo utilizado (mufla cerrada),</p>	<p>Uso de una mufla aireada, que permita una reacción de combustión completa, mejorando la calidad del agua obtenida.</p>

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.1. Propuesta de mejoras a sistema de tratamiento (continuación).

MEJORAS	DISEÑO EXPERIMENTAL	DESVENTAJAS	PROPUESTA
<p><b>Altura de lecho de carbón activado</b></p>	 <p>Características: La altura actual de la columna es de 23 cm de carbón peletizado.</p>	<p>Superficie de contacto insuficiente, altura y/o cantidad de carbón activado no es la adecuada</p>	 <p>Utilizar carbón activado granular y aumentar la altura columna de carbón</p>

Fuente: Elaboración propia

### 4.3 PROPUESTA DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO PARA DISMINUIR FLUORUROS DEL AGUA DEL POZO DE CASERÍO ESCAMIL

A partir de las potenciales mejoras que se pueden aplicar al sistema de tratamientos para reducción de fluoruros de agua de pozo se propone un sistema de tratamientos para agua de pozo del caserío Escamil descrito en los siguientes apartados.

#### 4.3.1 Caracterización de materias primas

Los materiales utilizados para la elaboración del sistema de tratamiento de agua han sido escogidos por su facilidad para encontrarlos a precios accesible en el país y por sus propiedades como materiales filtrantes.

#### 4.3.1.1 Carbón de hueso bovino

En el hombre y mamíferos superiores el hueso se compone de colágeno, sustancia fundamental y minerales.

El colágeno y la sustancia fundamental comprenden la parte orgánica del hueso, mientras que la fase inorgánica comprende las sales minerales. La rigidez y consistencia típica del hueso se debe a que las fibras de colágeno forman andamios sobre los cuales se depositan los cristales de las sales minerales.

La relación de la parte orgánica con la inorgánica es de 1:2 aproximadamente. En la tabla 4.2 se muestra la composición media de la fracción orgánica y mineral de un hueso de toro. La parte mineral generalmente ocupa entre el 65 % y 70 % mientras que la parte orgánica entre el 30 % al 35 % sobre la base del peso seco. (Carrillo, 2010)

Tabla 4.2. Composición de un hueso de toro desgrasado y seco

<b>Componente</b>	<b>Porcentaje (%)</b>
<b>Colágeno</b>	33.30
<b>Fosfato de calcio</b>	57.35
<b>Carbonato de calcio</b>	3.85
<b>Fosfato de magnesio</b>	2.05
<b>Carbonato y cloruros sódicos</b>	3.45
<b>Total</b>	100

*Fuente: Carrillo, 2010*

Con respecto a la fracción mineral, en la tabla 4.3 se presenta un detalle del contenido de minerales presentes en los huesos de vacuno. La composición de la fracción mineral posee en su mayoría calcio, fosfatos e iones hidroxilo.

Adicionalmente puede contener en menor proporción cationes de magnesio y estroncio. Aproximadamente el 80% es fosfato de calcio el resto es fosfato de magnesio, fosfato de sodio,

carbonato de calcio y citrato de calcio, también en menores proporciones potasio, sodio, fluoruros y cloruros.

La estructura maciza del hueso se debe a la presencia de sales, su composición es similar a las apatitas las que contienen cationes divalentes, aniones trivalentes tetraédricos y aniones monovalentes que análogamente en los huesos corresponden a cationes de calcio, orto fosfatos y aniones hidroxilo respectivamente.

Tabla 4.3. Composición mineral de un hueso de bovino desgrasado y seco.

Constituyentes del hueso	Porcentaje
<b>Cationes</b>	
<b>Calcio</b>	26.70
<b>Magnesio</b>	0.44
<b>Sodio</b>	0.73
<b>Potasio</b>	0.05
<b>Aniones</b>	
<b>Fosforo (PO<sub>4</sub>)<sup>-3</sup></b>	12.5
<b>Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)</b>	3.5
<b>Ácido cítrico</b>	0.36
<b>Cloruros</b>	0.08
<b>Fluoruros</b>	0.07

*Fuente: Carrillo, 2010.*

#### **4.3.1.2 Grava sílica** (Carbotecnia, 2007)

Se elabora a partir de sílice natural, se utiliza como Medio de soporte para filtros multimedia, carbón activado y suavizadores; La grava sílica se produce por trituración de piedra de sílica de textura abierta, cribada a distribución de grano necesaria.

La grava de sílice es producida por trituración de molienda y lavado de la sílice de alta calidad. Se utiliza como soporte de medios filtrantes, la parte cóncava de los tanques son áreas que no intervienen en la filtración, en la mayoría de los casos es recomendable rellenar con grava sílica está área, por ser un material que no le imparte ninguna característica al agua a tratar y es mucho más económica.

Características físicas: arena de granulo duro. El tamaño de grano de las partículas es variable, es cribable y principalmente de color marrón a gris. En la figura 4.4 se muestra la composición química de la grava sílica.

Tabla 4.4. Composición química de la grava sílica

<b>Composición</b>	
<b>SiO<sub>2</sub> (Óxido de silicio)</b>	79%
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Óxido de hierro)</b>	5.2%
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Óxido de aluminio)</b>	12.10%
<b>% humedad</b>	0.03
<b>Densidad</b>	2.4

Fuente: (Carbotecnia, 2007)

#### **4.3.1.3 Arena sílica**

La arena sílica o arena de sílice es un compuesto resultante de la combinación del sílice con el oxígeno. Su composición química está formada por un átomo de sílice y dos átomos de Oxígeno, formando una molécula muy estable: SiO.

Esta molécula es insoluble en agua y en la naturaleza se encuentra en forma de cuarzo. Si el cuarzo está cristalizado se denomina cristal de roca. Pertenece a la clase de los silicatos y al sistema cristalino trigonal. Este mineral es muy rico en variedades, los que se pueden agrupar en Macro cristalinas, con cristales bien visibles a simple vista, y Criptocristalinas, formada por cristales microscópicos.

### Usos más importantes:

Los usos industriales de la sílice derivan de sus importantes propiedades físicas y químicas, destacándose especialmente su dureza, resistencia química, alto punto de fusión, piezoelectricidad, piroelectricidad y transparencia.

Las arenas son utilizadas como lecho filtrante para depuración y potabilización de las aguas (para la retención de los flósculos de tamaños muy pequeños que no son separados por decantación) y por su dureza son utilizados para la fabricación de lejías, abrasivos industriales y arenados.

Es una materia prima muy importante en la composición de las fórmulas de detergentes, pinturas, hormigones y morteros especiales, y constituyen la materia prima básica para la obtención del silicio, así mismo son la base para la fabricación de refractarios de sílica y arenas de modelo, dado su alto punto de fusión (Carbotecnia, 2007).

Tabla 4.5 Composición química de la arena sílica

<b>Composición</b>	
<b>SiO<sub>2</sub> (Oxido de silicio)</b>	79%
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Oxido de hierro)</b>	5.2%
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Oxido de aluminio)</b>	12.10%
<b>% humedad</b>	0.03
<b>Densidad</b>	2.4

Fuente: (Carbotecnia, 2007)

#### **4.3.1.4 Carbón activado** (E. U. Politecnica Sevilla)

En la actualidad, el carbón activado es utilizado para remover color, olor y sabor de una infinidad de productos, por lo cual se puede encontrar en aplicaciones tan sencillas como peceras o filtros de refrigerador, hasta complejos sistemas industriales como modernas plantas de tratamiento de aguas residuales o delicados sistemas de elaboración de antibióticos.

Son dos las características fundamentales en las que se basan las aplicaciones del carbón activado: elevada capacidad de eliminación de sustancias y baja selectividad de retención.

El término carbón activo designa un amplio espectro de materiales que se diferencian fundamentalmente en su estructura interna (distinción de poros y superficie específica) y en su granulometría.

Desde el punto de vista de la composición química, el carbón activo es carbón prácticamente puro, al igual que lo es el diamante, el grafito, el negro de humo y los diversos carbones minerales o de leña. Todos ellos poseen la propiedad de adsorber, que consiste en un fenómeno fisicoquímico en el que un sólido llamado adsorbente atrapa en sus paredes a cierto tipo de moléculas, llamadas adsorbatos y que están contenidas en un líquido o gas.

Tabla 4.6. Composición química del carbón activado

<b>Composición</b>	
<b>Carbono</b>	75 - 80 %
<b>Cenizas</b>	10 %
<b>Oxigeno</b>	60 %
<b>Hidrogeno</b>	0,5 %

Fuente: (E. U. Politecnica Sevilla)

#### **4.3.1.5 Grava**

La Grava es un agregado grueso de uso común y generalizado; es un material que se extrae de rocas de cantera, triturados o procesados a partir de procedimientos mecánicos. El proceso de

producción de la Grava es tal que debe asegurar que las partículas constitutivas tengan un rango de tamaño de 3/4 de pulgada aproximadamente.

Por sus propiedades, es necesario que la Grava provenga de materiales de amplia vida útil, resistentes y sólidos mecánicamente, completamente libre de partículas contaminantes. La granulometría de la grava pueden ser desde muy pequeñas, de 3/6 a 3/8 de pulgada, y hasta grava triturada de tamaño mayor, es decir, de 3 a 6 pulgadas.

#### 4.3.2 Diseño del sistema de tratamiento

Se propone, como sistema de tratamientos para reducción de fluoruros de agua de pozo del caserío Escamil, cantón Santa Rosa, Agua Caliente, Chalatenango un sistema que cuente con tres etapas, la primera etapa de remoción de fluoruros con hueso molido calcinado de por lo menos 23 cm de altura, la segunda etapa de purificación con arena sílica y arena de río, y una tercera etapa conteniendo una sola capa de carbón activado para reducción de olor, sabor, color y mejorar la calidad del agua.

Para ello se propone utilizar recipientes elaborados para contener material filtrante, disponibles en tiendas en línea que cumplan con las medidas necesarias para realizar el proceso de tratamiento para disminuir fluoruros. En la figura 4.7 se muestra el recipiente sus complementos propuestos para el montaje del sistema de tratamiento de agua.



Figura 4.2. Equipo propuesto para sistema de tratamiento

En la tabla 4.7 se muestra el costo del equipo y materia prima propuestos, además de su respectivo mantenimiento.

Tabla 4.7. Costeo y mantenimiento del sistema de filtración

<b>Cantidad</b>	<b>Descripción</b>	<b>Precio en el mercado</b>	<b>Total</b>
<b>1.5 Kit de carcasa</b>	2 tubos, 3m de manguera, 4 tapaderas con malla, 2 clips unión, 4 codos para las tapaderas	\$20.67	\$31.00
<b>1</b>	Soporte para el sistema de filtración	\$10.00	\$10.00
<b>1 Lb</b>	Arena de rio	\$0.30	\$0.30
<b>1.5 Lb</b>	Arena silica	\$2.00	\$3.00
<b>1 Lb</b>	Carbón activado	\$31.00	\$31.00
<b>2</b>	Válvulas Check	\$3.95	\$7.90
<b>2</b>	Unión T	\$0.50	\$1.00
<b>1</b>	Grifo cuello de ganso	\$5.95	\$5.95
<b>1.5</b>	Carbón de hueso calcinado	\$35	\$52.50
<b>Total</b>			\$142.65
<b>Porcentaje de ganancia 35%</b>			\$49.92
<b>Precio del sistema de filtración al mercado</b>			\$192.57
<b>Gastos por Instalación</b>			\$30.00
<b>Precio sistema de filtración más instalación</b>			\$222.57
<b>Mantenimiento cada 4 a 6 meses ( regeneración de lechos de carbón de hueso calcinado, lavados y desinfección de lechos)</b>			\$40.0

Fuente: Elaboración propia

#### **4.3.2.1 Montaje del sistema de tratamiento de agua**

El equipo propuesto tiene la capacidad de almacenar columnas de 25.4 cm de altura de material filtrante, a partir de esto, se diseña el sistema de tratamiento para disminuir fluoruros del agua del pozo de caserío Escamil, como se describe a continuación:

Se tiene un primer recipiente con dos tapaderas equipadas con un tamiz para evitar la pérdida de materiales, en esta etapa se coloca una columna de 25.4 cm de hueso calcinado que será el responsable de la remoción de fluoruros, además en esta etapa se tendrá la entrada de agua desde el sistema de abastecimiento de agua a través de una manguera de  $\frac{3}{4}$ " y la recirculación de agua según se determinó en el experimento óptimo.

En el segundo recipiente se lleva a cabo una filtración, conteniendo una columna de 12.45 cm de arena de río y una columna de 12.45 de arena silica, las columnas se encuentran separadas por un tamiz fino para evitar la mezcla del material filtrante, en esta etapa se recibe el agua que ha sido desflorada a través de una manquera de  $\frac{3}{4}$ "

En el tercer recipiente se lleva a cabo la remoción de color y olor del agua, dicha etapa consta de una columna de carbón activado, esta es la etapa final del sistema de remoción de fluoruros, el agua tratada sale de esta etapa a través de una manguera de  $\frac{3}{4}$ " para conectar con un grifo.

Algunos de los accesorios con que contaría el sistema de remoción de fluoruros son los siguientes:

Tapaderas: el sistema tendrá seis tapaderas con tamiz, cada recipiente tendrá dos, evitan la pérdida de materiales además de evitar el derrame de agua del sistema que trabajara a presión, además cada una permite la entrada o salida de fluido de acuerdo a la dirección de flujo.

Abrazaderas: se necesitan de cuatro abrazaderas para mantener unidas las etapas una de otra.

Codos, uniones T y mangueras: Estos accesorios permiten conectar entre etapas, permitiendo que el agua fluya por todo el sistema.

Válvulas check: el sistema consta de dos válvulas de este tipo una a la entrada de todo el sistema para evitar que el agua tratada fluya en sentido contrario y otras que permite que de entrada fluya en por la manguera que transporta el agua recirculada.

Grifo: sirve como dispensador del agua tratada.

En la tabla 4.8 se muestran los parámetros de operación del sistema de tratamiento propuesto.

Tabla 4.8. Parámetros de operación del sistema de tratamiento propuesto.

<b>Parámetros de operación</b>	
<b>Presión de entrada</b>	38 PSI
<b>Tasa de filtración</b>	1.5 L/min
<b>Material filtrante</b>	Arena
<b>Material de adsorción</b>	Carbón activado, carbón granular de hueso
<b>Diámetro de tubos de entrada</b>	1/4 in
<b>Diámetros de tubos de salida</b>	1/4 in
<b>Diámetro de carcasa del filtro</b>	5 cm
<b>Diámetros de válvulas, codos, check y otras conexiones</b>	1/4 in
<b>Longitud de carcasa</b>	26 cm
<b>Granulometría del carbón de hueso</b>	0.05mm a 3.0mm
<b>Altura del lecho del carbón de hueso</b>	25.4 cm
<b>Altura del lecho de arena silica</b>	12.45 cm
<b>Altura del lecho de rio</b>	12.45 cm
<b>Altura del lecho de carbón activado</b>	25.4 cm

Fuente: Elaboración propia

En la figura 4.3 se muestra el plano del montaje completo que se propone para el tratamiento del agua de pozo del caserío Escamil.

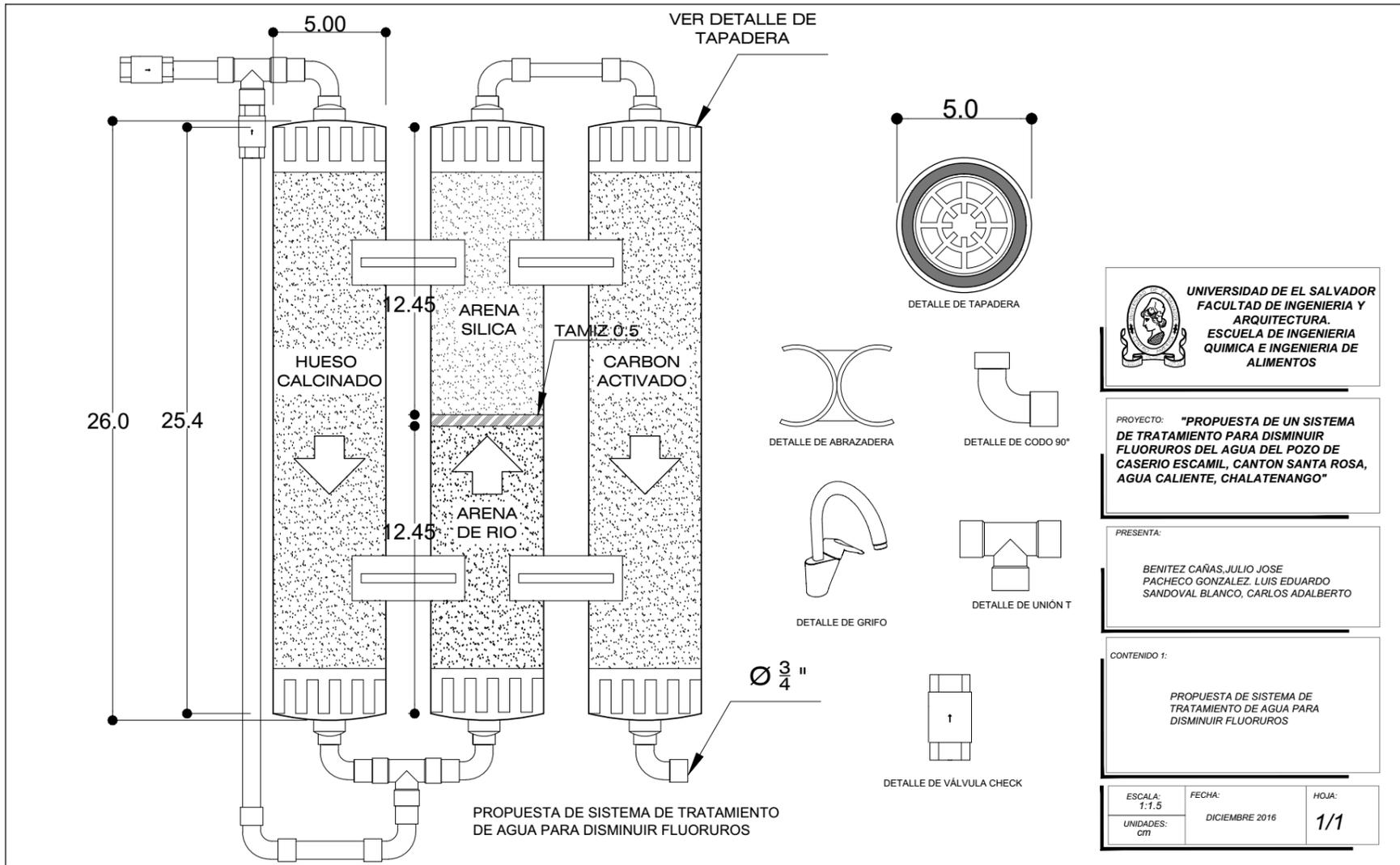


Figura 4.3. Planos de propuesta del sistema de tratamiento de aguas para disminuir fluoruros de agua de pozo de caserío Escamil.

### **4.3.3 Mantenimiento del sistema de tratamiento**

Cada una de las etapas de sistema de remoción de fluoruros requiere de mantenimiento regular con la finalidad de obtener siempre buenos resultados en el tratamiento del agua del pozo.

#### **4.3.3.1 Carbón de hueso molido** (Ayestas)

El contralavado se hace por cinco minutos. Se llevará gradualmente hasta producir una expansión del 30 al 50% del espesor del manto. Debe impedirse pérdidas por arrastre o proyección, de allí que ha de comenzarse muy suavemente para evitar bruscas proyecciones

Luego se procede a extraer toda el agua, dejando escurrir bien el manto de manera de afectar lo menos posible la concentración de la soda caustica regenerante. Esta será de aproximadamente 1 a 1,2%. No ha de ser inferior a 1% y el volumen a utilizar será el equivalente a dos veces el volumen del hueso, pudiendo ser ligeramente menor pero no inferior a 1.8 veces el de dicho material.

El ingreso de la soda se hará con el desagüe cerrado en forma lenta hasta permitir que cubra todo el hueso. Se deja unos 30 a 60 minutos en contacto y luego se descarga rápidamente dejando escurrir bien. Una vez logrado esto se cierra el desagüe, se vuelve a cargar con soda y se deja toda la noche. Al día siguiente se termina de pasar lentamente toda la soda.

Si urge la incorporación al servicio de los equipos en regeneración puede reducirse el tiempo de contacto con la soda a unas dos horas para luego seguir pasando muy lentamente el resto del regenerante. Si hay posibilidad, luego de pasar el primer volumen de soda en la forma indicada y evacuada la misma, el resto se pasará en forma lenta y continua recirculándolo por tres veces.

Si esta soda tiene menos de 0,852 de soda cáustica se ha de reforzar, llevándola nuevamente a 1%.

La recirculación con concentración apropiada mantiene un buen contacto hueso-soda, favoreciendo la regeneración. Si la regeneración no es todo lo efectiva que debiera; hecho que puede darse en especial en invierno, es decir, cuando las temperaturas son bajas, recircular mayor tiempo.

Una vez terminada la regeneración con soda se procede a eliminar el exceso de ésta retenida por el hueso. Se ha de pasar agua en sentido descendente a baja velocidad hasta bajo contenido de alcalinidad caustica: 0,15% o menos.

Además al finalizar hacer pasar por el lecho de hueso molido una solución de cloro con una concentración de 2 mg/L, con el fin de desinfectar el lecho.

#### **4.3.3.2 Carbón activado** (E. U. Politecnica Sevilla)

El carbón activado granular que se utiliza en los procesos de tratamiento de agua potable, tiene dos funciones: retener contaminantes orgánicos y eliminar el cloro libre residual que proviene de la etapa de desinfección previa.

Aunque ambas funciones son importantes, suele perderse de vista la primera, ya que, si el carbón activado falla en ella, no se notan a corto plazo los efectos negativos.

En cambio, si el carbón activado no declora bien el agua, ésta queda con el olor y el sabor que produce el cloro, y que es muy perceptible y desagradable. Por lo tanto, el criterio con el que suele evaluarse el desempeño del carbón activado, es la ausencia de cloro libre en el agua tratada por éste.

Desafortunadamente, es mucho mayor la capacidad del carbón activado para eliminar cloro libre que para adsorber materia orgánica. Esto se debe a que la eliminación del cloro ocurre por una reacción química en la que el carbón es muy eficiente. Por lo tanto, cuando se espera hasta detectar cloro libre en el agua tratada, como criterio para cambiar el carbón activado, lo más probable es que mucho tiempo antes el carbón ha dejado de retener contaminantes orgánicos.

Dichos contaminantes orgánicos se encuentran presentes en todo cuerpo de agua natural: pozos, ríos, lagos, agua de deshielo. Muchos de ellos son sintéticos (no existían antes de la era industrial) y dañan al hombre ya que éste no se encuentra adaptado a ellos, pues no estuvieron presentes en el ambiente durante el largo periodo evolutivo de la especie humana. Las normas de agua potable establecen para ellos, niveles máximos permisibles que son del orden de partes por billón. Entre estos contaminantes están: benceno, tolueno, hexaclorobenceno, trihalometanos totales, todos los plaguicidas, Etc.

Como criterio práctico, se recomienda cambiar el carbón activado cada año. Y esto, desde el punto de vista económico, no tiene gran incidencia en el costo del agua tratada, otra ventaja de cambiar el carbón activado al año, es que el cambio se hace de manera planeada.

El cambio del carbón, también permite inspeccionar interiormente el equipo que lo contiene y realizar las labores de mantenimiento originadas por las observaciones realizadas en dicha inspección.

**4.3.3.3 Demás material filtrante** (Centre for affordable Water ans Sanitation Technology, 2009)

Ya que con el paso del tiempo, la velocidad de flujo del agua que pasa a través del filtro irá bajando al pasar por las capas de arena y piedra silica a medida que va funcionando y atrapando sólidos suspendidos en la capa superior de la arena. Los usuarios se van a dar cuenta cuándo es que deben realizar un retro lavado de la arena o el cambio de los materiales, ya que la velocidad de flujo del filtro bajará a un nivel que ya no es aceptable. Aun cuando la velocidad de flujo se ha reducido, el filtro todavía sigue tratando el agua de manera efectiva; lo que sucede es que el tiempo que toma llenar un contenedor de agua tratada puede ser demasiado largo y resultar inconveniente para el usuario.

Además también deber realizarse el lavado de esta parte del sistema utilizando una solución de cloro con una concentración de 2 mg/L, con el fin de desinfectar el lecho.

## **CAPÍTULO 5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

Se caracterizó el agua de pozo del caserío Escamil para determinar su condición respecto a los parámetros fisicoquímicos mínimos que debe cumplir para uso como agua potable. Se realizó un diseño experimental para determinar los factores óptimos de funcionamiento de un sistema de tratamiento de remoción de fluoruros para agua de pozo, utilizando hueso bovino calcinado. Se determinó la temperatura de calcinación a la cual se debe preparar el hueso bovino. Se verifico a nivel experimental el cumplimiento de la norma NSO 13.07.02:08, de los parámetros mínimos que debe cumplir el agua de pozo para ser potable. Se realizó una propuesta de un sistema de tratamiento para reducción de fluoruros de agua de pozo para ser utilizado por las

familias del caserío Escamil. A continuación se presenta el análisis y discusión de resultados obtenidos en esta investigación.

### 5.1 DETERMINACIÓN DE TEMPERATURAS DE CALCINACIÓN

Se realizó una prueba de jarras para determinar la temperatura óptima de calcinación del hueso para ser utilizado en la remoción de fluoruros del agua de pozo, manteniendo constantes la agitación, el tiempo de contacto, la concentración inicial y el volumen de hueso y agua. Obteniéndose los resultados presentados en la tabla 5.1, a continuación.

Tabla 5.1. Eficiencia de remoción de fluoruros a distintos tiempos de calcinación.

<b>T°</b>	<b>Cf</b>	<b>Eficiencia de Remoción (%)</b>
<b>450</b>	0,8	84,31
<b>500</b>	1,6	68,63
<b>550</b>	1,6	68,63
<b>600</b>	2,4	52,94
<b>650</b>	5,1	0

Fuente: Elaboración propia

En la tabla anterior se puede observar que la temperatura de calcinación a la cual el hueso presenta mayor eficiencia en la remoción de fluoruros del agua de pozo es 450° C, con una eficiencia de 84.31%. También se puede observar que la eficiencia disminuye a medida aumenta la temperatura de calcinación. Además, como lo sugiere la bibliografía consultada a temperaturas altas el hueso calcinado pierde sus propiedades como intercambiador iónico, como se pudo comprobar a 650° C, temperatura a la cual la eficiencia de remoción de fluoruros corresponde a cero por ciento.

A temperatura de 500° C al igual que a 550° C se obtuvo una eficiencia de remoción de 68.63%, y a 600° C la eficiencia, a pesar de que disminuye, continua siendo significativa alcanzando hasta un 52.94% de remoción.

Se logró observar que al utilizar hueso molido sin calcinar la eficiencia de remoción disminuye, alcanzando como máxima remoción para los tiempos probados de 30.07%, significativamente menor que la remoción de fluoruros con hueso molido calcinado. Además, al utilizar hueso

molido bovino sin calcinar, preparado por métodos químicos se obtiene agua tratada de color blanquecino, turbia, con exceso de grasa, lo cual la vuelve un agua no potable, a pesar de ofrecer una disminución en la concentración de fluoruros.

## 5.2 DISEÑO EXPERIMENTAL PRELIMINAR

En la prueba preliminar realizada se enviaron muestras al laboratorio para verificar la calidad del agua, obteniendo los resultados mostrados en la tabla 5.2.

Tabla 5.2. Resultados de análisis fisicoquímicos a muestras de agua tratadas durante la prueba preliminar

<b>Parámetro</b>	<b>Valor medido en el agua tratada en la prueba preliminar</b>	<b>Límite máximo permisible según NSO 13.07.02:08</b>	<b>Observación</b>
<b>pH</b>	8.0	8.5	Cumple (-0.5)
<b>Turbidez</b>	1.34 NTU	5 NTU	Cumple (-3.66)
<b>Conductividad</b>	691.4 $\mu\text{s}/\text{cm}$		
<b>Sólidos totales disueltos</b>	345 mg/L	1000 mg/L	Cumple (-655)
<b>Color</b>	24.8 Pt-Co	15 Pt-Co	No cumple (9.8)
<b>Sulfatos</b>	145 mg/L	400.0 mg/L	Cumple (-255)
<b>Nitratos</b>	No detectado	45 mg/L	Cumple (-45)
<b>Dureza</b>	50 mg/L	500 mg/L	Cumple (-450)
<b>Fluoruros</b>	1.0 mg/L	1.0 mg/L	Cumple (0)

Fuente: Elaboración propia

Se puede observar que en la prueba preliminar se cumplen con los parámetros establecido por la norma, excepto para el color el cual presentaba un color amarillo claro muy visible, además de que se cumple la norma para fluoruros pero alcanzando el límite máximo, por lo que fue necesario a partir de estos resultados plantear un diseño experimental que optimizara los parámetros utilizados para el diseño de un sistema de tratamiento.

## 5.3 DISEÑO DE EXPERIMENTOS Y OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA

Se realizaron 16 experimentos utilizando el diseño factorial  $2^4$ , de 4 factores a 2 niveles, utilizando la herramienta STATGRAPHICS, para determinar las condiciones óptimas de operación del diseño experimental para disminuir fluoruros de agua de pozo del caserío Escamil,

determinándose que los factores que son significativos en el experimento son: concentración de fluoruros en el agua a tratar, altura del lecho del hueso calcinado, y el factor recirculación. Siendo no significativo el caudal, para este experimento.

Los valores óptimos encontrados para estos factores, se encontraron en la corrida número 3, como se resume en la tabla 5.3.

Tabla 5.3. Valores óptimos de los factores del diseño experimental para disminución de fluoruros

Prueba	Recirculación	Caudal	Concentración	Altura	Resultado (mg/L)	% de remoción
<b>Descripción</b>	+	-	+	+	0,6	96,57
<b>Valor</b>	Si	-	17.5 mg/L	23 cm		

Fuente: Elaboración propia

El experimento óptimo se realizó utilizando la recirculación, el factor de altura del lecho de hueso molido de 23 cm, el factor concentración de fluoruros será variante por las concentraciones de fluoruros que contenga el agua del pozo, y se realizó el experimento utilizando una muestra reciente que contenía 5.2 mg/L de fluoruros. El factor caudal es indiferente, pues no es un factor significativo, pero se utilizó en su mínimo valor, es decir, 514.2 mL/min. Obteniéndose para concentración de fluoruros un valor de 0.5 mg/L. como se muestra en la tabla 5.4.

Tabla 5.4. Medición de fluoruros en agua tratada con el sistema experimental óptimo.

Experimento	Concentración de fluoruros en muestra de agua de pozo	Concentración de fluoruros en muestra de agua tratada	Observación	Porcentaje de remoción
<b>1</b>	5.2 mg/L	0.5 mg/L	Disminuye 4.7 mg/L	90.38 %
<b>2</b>	5.2 mg/L	0.5 mg/L	Disminuye 4.7 mg/L	90.38 %
<b>3</b>	5.2 mg/L	0.5 mg/L	Disminuye 4.7 mg/L	90.38 %
<b>Promedio</b>			Disminuye 4.7 mg/L	90.38 %

Fuente: Elaboración propia

Se observa que se logró una eficiencia de 90.38 % de remoción de fluoruros a nivel experimental con el sistema de tratamiento diseñado a nivel experimental. La efectividad disminuye respecto a la corrida 3 que contenía las mismas condiciones óptimas que el diseño final, debido a que para la prueba del diseño experimental se utilizó una solución preparada de 17.5 mg/L de fluoruros y en el experimento final se utilizó una muestra de agua de pozo del caserío Escamil que contenía una concentración de fluoruros de 5.2 mg/L.

Los resultados de los parámetros fisicoquímicos analizados para la muestra de agua de pozo tratada en el experimento final se muestran a continuación en la tabla 5.5.

Tabla 5.5. Resultados de análisis fisicoquímicos a muestras de agua tratadas con el sistema experimental.

<b>Parámetro</b>	<b>Caracterización</b>	<b>Valor medido en el agua tratada en el experimento</b>	<b>Observación</b>
<b>pH</b>	9.03	7.8	Disminuye (-1.5)
<b>Turbidez</b>	1.78 NTU	0.33 NTU	Disminuye (-1.45)
<b>Conductividad</b>	625 $\mu$ s/cm	658. $\mu$ s/cm	Aumenta (+33)
<b>Sólidos totales disueltos</b>	416 mg/L	345 mg/L	Disminuye (-271)
<b>Color</b>	0 Pt-Co	No detectado	No varía
<b>Sulfatos</b>	144.18 mg/L	151 mg/L	Aumenta (-6.82)
<b>Nitratos</b>	2.8 mg/L	No detectado	Disminuye (-2.8)
<b>Dureza</b>	10.14 mg/L	30 mg/L	Aumenta (-19.86)
<b>Fluoruros</b>	4.08 mg/L	0.5 mg/L	Disminuye (-3.6)

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla anterior, se comparan los valores obtenidos para los parámetros fisicoquímicos analizados en la prueba experimental final con los valores obtenidos en la caracterización inicial del agua de pozo, notando un aumento en la conductividad, que coincide con el aumento en la dureza y los sulfatos. Al aumento de la dureza se debe a los componentes utilizados para el tratamiento del agua, tales como arena de río y arena sílica. Los sulfatos aumentan debido a que la caracterización se realizó durante la época seca y el experimento se desarrolló durante la época lluviosa. El aumento en la conductividad se debe al aumento de los iones de sulfato y dureza.

En la tabla 5.6 se comparan los resultados de la prueba experimental con la norma NSO 13.07.02:08.

Tabla 5.6. Resultados de análisis realizados a muestras tratadas con el sistema experimental

<b>Parámetro</b>	<b>Valor medido en el agua tratada en el experimento</b>	<b>Límite máximo permisible según NSO 13.07.02:08</b>	<b>Observación</b>
<b>pH</b>	7.8	8.5	Cumple (-0.7)
<b>Turbidez</b>	0.33 NTU	5 NTU	Cumple (-4.67)
<b>Conductividad</b>	658. $\mu$ s/cm		
<b>Sólidos totales disueltos</b>	345 mg/L	1000 mg/L	Cumple (-655)
<b>Color</b>	No detectado	15 Pt-Co	Cumple (-15)
<b>Sulfatos</b>	151 mg/L	400.0 mg/L	Cumple (-249)
<b>Nitratos</b>	No detectado	45 mg/L	Cumple (-45)
<b>Dureza</b>	30 mg/L	500 mg/L	Cumple (-470)
<b>Fluoruros</b>	<b>0.5 mg/L</b>	<b>1 mg/L</b>	<b>Cumple (-0.5)</b>

Fuente: Elaboración propia

Se puede observar que luego del tratamiento con el sistema experimental determinado como óptimo, se logró cumplir con todos los requerimientos de la norma NSO 13.07.02:08 para agua potable analizados en el agua tratada del pozo del caserío Escamil. Pero al realizar las pruebas organolépticas se encontró sabor y olor en el agua, por lo que se debe mejorar el sistema para reducir estas características desfavorables para ser aptas para consumo humano.

A partir del sistema experimental óptimo se propone un sistema de tratamiento para reducción de fluoruros de agua de pozo del caserío Escamil, cantón Santa Rosa, Agua Caliente, Chalatenango. Se propone mejorar el montaje para disminuir el espacio ocupado utilizando recipientes de diámetro uniforme y acoplados de forma horizontal utilizando la presión del agua a la salida del grifo como fuerza motriz; se propone mejorar la técnica de calcinación del hueso utilizando una mufla aireada, que permita la reacción de combustión completa para evitar el color y olor que se transmite al agua durante el tratamiento; se propone aumentar la altura de la columna de carbón activado y sustituirlo por carbón granular en lugar de pellets para aumentar la superficie de contacto, y mejorar la calidad del agua respecto al sabor y el olor.

## CONCLUSIONES

1. Según la investigación bibliográfica realizada la presencia de flúor en las aguas del pozo del caserío Escamil se puede atribuir a la existencia de fluidos geotérmicos en las zonas aledañas, lo que generalmente indica la presencia de este mineral en diferentes especies fluoradas como la fluorina, fluoruro de calcio y criolita o en rocas como las micas, anfíboles y turmalinas que debido a la exposición a aguas sobrecalentadas a presiones elevadas moviliza el flúor pasando principalmente a las aguas subterráneas y superficiales.
2. Se verificó que el agua del pozo del caserío Escamil no cumple con la norma salvadoreña NSO 13.07.02:08 para pH ni para fluoruros además de presentar un valor elevado de conductividad lo cual es común para este tipo de aguas.
3. Se determinó, mediante pruebas experimentales, que el hueso bovino calcinado a una temperatura de 450° C presentó un porcentaje de remoción de fluoruros del 84.31% mientras que el hueso bovino tratado químicamente con hidróxido de sodio únicamente presento un porcentaje de remoción fluoruros del 31.37 %, por lo tanto se utilizó para los siguientes experimentos y para el sistema de tratamiento a nivel de planta piloto el uso de hueso bovino calcinado.
4. Se logró determinar mediante el diseño experimental que la concentración de fluoruros en el agua tratada del pozo del caserío Escamil cumpliera con el límite máximo permitido en la norma salvadoreña NSO 13.07.02:08 obteniéndose una efectividad de remoción de 90.38%, siendo la concentración inicial de fluoruros en el agua de 5.2 mg/L y se llevó a una concentración final de 0.5 mg/L.
5. Al analizar el agua tratada con el sistema experimental se demostró que cumple con los parámetros de la norma salvadoreña NSO 13.07.02:08, pero al realizar la prueba organoléptica se detectó un leve sabor y olor a carbón.
6. Al aplicar un diseño experimental del tipo 2<sup>k</sup> para determinar el grado de significancia de los principales factores que intervienen en el sistema de remoción de fluoruros se logró

obtener la combinación óptima de variables que permiten la máxima remoción de fluoruros por el diseño experimental. Siendo esta combinación: utilizar recirculación, altura del lecho de hueso molido de 23 cm, concentración de fluoruros en su valor máximo, pero este será variante por las concentraciones de fluoruros que contenga el agua del pozo, y el factor caudal es indiferente, pues no es un factor significativo.

## RECOMENDACIONES

1. Es importante continuar desarrollando estudios sobre fluoruros en aguas para consumo humano en El Salvador, integrando diferentes sectores tanto públicos como privados que tengan responsabilidad sobre los efectos nocivos que puede llegar a causar el consumo prolongado de aguas contaminadas con fluoruros en la población salvadoreña.
  - a. Para poder establecer una relación de la contaminación con fluoruros de las aguas del caserío Escamil y la composición rocosa del sitio, es necesario la realización de estudios de suelo en las zonas afectadas y así poder descartar o no esta fuente de contaminación.
2. Se hace necesaria la realización de nuevas investigaciones sobre el uso de hueso bovino calcinado como medio para la remoción de fluoruros en guas y así poder determinar: cuál es la vida útil del hueso bovino calcinado y además definir el proceso de regeneración del lecho con soluciones de hidróxido de sodio diluidas.
3. Se recomienda hacer un seguimiento de la variación de la concentración de fluoruros en el agua de pozo del caserío en función del tiempo, para corroborar que el sistema propuesto será efectivo en todo momento.
4. Para la calcinación del hueso bovino es necesario utilizar una mufla con sistema de aireación, que permita una reacción de combustión completa que mejore la calidad del hueso, para evitar la transferencia de color y olor al agua que entra en contacto con este.
5. Para la preparación del hueso realizar por lo menos dos lavados con soda caustica al hueso previamente calcinado para eliminar color y olor.
6. Se recomienda añadir una etapa de aireación posterior al contacto con el hueso calcinado y previa a los filtros de arena y carbón activado, para disminuir el sabor y olor a quemado que aún se percibe en el agua tratada.

7. Añadir otra etapa de filtración con carbón activado, o hacer una sola columna de carbón activada más alta que la propuesta en este sistema para eliminar sabor y olor que aún se encuentran presentes.
8. Se recomienda analizar la factibilidad técnica, económica y ambiental de la implementación de un sistema de remoción de fluoruros a escala de planta de tratamiento para el caserío Escamil.
9. Es necesario realizar pruebas y dar un seguimiento microbiológico al agua tratada con el sistema propuesto ya que es agua que se acondiciona para consumo humano.
10. Se debe seguir investigando para determinar si la presencia de flúor en las aguas del pozo del caserío Escamil se debe a la existencia de fluidos geotérmicos en las zonas aledañas.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 ANDA. (2013). *Boletín Estadístico 2013*. Obtenido de Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados : <http://www.anda.gob.sv/wp-content/uploads/2015/05/Boletin-Estadistico-2013.pdf>
- 2 Ayestas, J. C. (s.f.). *Organización Panamericana de la Salud* . Obtenido de [www.bvsde.paho.org](http://www.bvsde.paho.org): <http://www.bvsde.paho.org/bvsacg/fulltext/godoy.pdf>
- 3 Calderon, A. (julio de 2013). *Toma de muestras*. Obtenido de Métodos de análisis de aguas: [www.drcalderonlabs.com](http://www.drcalderonlabs.com)
- 4 Carbotecnia. (2007). [www.carbotecnia.info](http://www.carbotecnia.info). Obtenido de <http://www.carbotecnia.info/producto/medio-arena-silica-para-filtros-de-agua/>
- 5 Carrillo, N. F. (Septiembre de 2010). *bibdigital*. Obtenido de Escuela Politécnica Nacional : <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/2379/1/CD-3111.pdf>
- 6 Centre for affordable Water ans Sanitation Technology. (Septiembre de 2009). *Manual para el Filtro de Bioarena*. Obtenido de <https://www.calvin.edu/>: [https://www.calvin.edu/academic/engineering/senior-design/SeniorDesign09-10/team02/web/Biosand\\_Manual\\_Spanish.pdf](https://www.calvin.edu/academic/engineering/senior-design/SeniorDesign09-10/team02/web/Biosand_Manual_Spanish.pdf)
- 7 Cordero, O. (2009). *Remoción parcial de fluoruros de agua potable*. Obtenido de Biblioteca Virtual de Desarrollo Sostenible y Salud Ambiental: <http://www.bvsde.paho.org/>
- 8 E. U. Politécnica Sevilla. (s.f.). [www.aguapedia.net](http://www.aguapedia.net). Obtenido de <http://www.elaguapotable.com/Manual%20del%20carb%C3%B3n%20activo.pdf>
- 9 Ente Nacional de Obras Hídricas de Saneamiento. (2010). *Remoción de flúor*. Obtenido de [ministeriodesalud](http://www.ministeriodesalud.gov.cr): [www.ministeriodesalud.gov.cr](http://www.ministeriodesalud.gov.cr)
- 10 Fundación Nacional para el Desarrollo. (2000). *Desarrollo económico, social y ambiental para tres microregiones de Chlatenango*. Obtenido de Fundación Nacional para el Desarrollo: <http://www.repo.funde.org/>
- 11 Girón, B., Márquez, R., & Sermeño, K. (2004). *Presencia y concentración de fluor en las marcas de sal distribuidas en El Salvador*. Recuperado el 5 de Marzo de 2016, de [redicces](http://www.redicces.org.sv/): <http://www.redicces.org.sv/>
- 12 Global Water Parthership. (Abril de 2011). *Global Water Parthership Central America*. (F. Tábor, Ed.) Obtenido de <http://www.gwp.org/es>: [http://www.gwp.org/Global/GWP-CAM\\_Files/SituaciondelosRecursosHidricos.pdf](http://www.gwp.org/Global/GWP-CAM_Files/SituaciondelosRecursosHidricos.pdf)
- 13 Hernández, R., & Martínez, A. (2008). *Determinación del ion fluoruro en aguas de consumo humano en los demaprtamentos de Santa Ana y Chalatenago*. San Salvador: Trabajo de Graduación.
- 14 Howard, G., & Bartram, J. (2003). *Domestic Water Quantity, Service Level and Health*. Obtenido de World Health Organization: <http://www.who.int>
- 15 IESPANA. (2013). *El fluor en el agua potable*. Obtenido de IABOT: <http://iabot.iespana.es/>
- 16 Iliana, E., Pérez Galdámez, G., & Vaquerano, L. (2010). *Efecto del consumo crónico de agua hiperfluorada sobre el coeficiente intelectual*. Recuperado el 5 de marzo de 2016, de [redicces](http://www.redicces.org.sv/): <http://www.redicces.org.sv/>
- 17 Instituto Geológico y Minero de España. (2003). [www.igme.es](http://www.igme.es). Obtenido de [http://www.igme.es/PanoramaMinero/Historico/2003\\_04/PPOMEZ03.pdf](http://www.igme.es/PanoramaMinero/Historico/2003_04/PPOMEZ03.pdf)

- 18 Latham, M. C. (2002). *NUTRICIÓN HUMANA EN EL MUNDO EN DESARROLLO*. Recuperado el 19 de Marzo de 2016, de Food and Agriculture Organization of the United Nations: <http://www.fao.org/docrep/006/w0073s/w0073s00.htm#Contents>
- 19 MAG. (Marzo de 2002). *Cartografía*. Obtenido de Ministerio de Agricultura y Ganadería : <http://cartografia.mag.gob.sv/index.php/documentacion-tecnica/category/1-documentacion-tecnica?download=2:clasificacion-de-suelos-por-division-politica-de-el-salvador>
- 20 MARN. (2011). *Informe de la calidad del agua de los rios de El Savador*. San Salvador. Recuperado el 8 de Octubre de 2,015, de <http://www.snet.gob.sv/ver/hidrologia/monitoreo+hidrologico/calidad+de+agua/calidad+de+agua+2011/>
- 21 Melgar Flores, M. Y., Moya Turcios, G., & Polio Martínez, M. d. (2012). *Calidad de Agua de Captación Superficial para Consumo Humano en El Tamarindo*. Obtenido de opac.fmoues: <http://opac.fmoues.edu.sv/>
- 22 Nalco Chemical Company. (s.f.). Capítulo 6. Contaminantes del agua: localización y. En N. C. Company, *Manual del agua: su naturaleza, tratamiento y aplicaciones* (págs. 11-12). McGraw-Hill.
- 23 Organismo Salvadoreño de Normalización. (12 de junio de 2009). *Norma Salvadoreña Obligatoria: Agua Potable*. Obtenido de USAM: [usam.salud.gob.sv](http://usam.salud.gob.sv)
- 24 Organización Panamericana de la Salud. (Agosto de 2002). *Pan American Health organization*. Recuperado el 3 de Marzo de 2016, de Estudio de concentración de fluor en aguas de consumo humano en El Salvador: <http://www2.paho.org/>
- 25 Ramírez, N. E., Castro, C., & Dominguez, S. N. (1997). *Alternativas de solución para regular la concentración de flúor a los límites permitidos en las aguas de los municipios de Ozatlán y El Sauce*. San Salvador: Trabajode Graduación.
- 26 Real Academia Nacional de Medicina. (1956). *Geoquímica de las aguas termales*. Obtenido de Instituto de España: <https://books.google.com.sv>
- 27 Rodríguez, M. R. (Noviembre de 2011). *Universidad Simon Bolívar*. Recuperado el 02 de 01 de 2017, de <http://159.90.210.77/sites/default/files/Pre/Melia%20Da%20Silva.pdf>
- 28 Rodriguez, P. (2011). *www.puraquimica.com*. Recuperado el 23 de Agosto de 2016, de <https://puraquimica.files.wordpress.com/2011/06/prc3a1ctica-4-qg-preparacic3b3n-de-soluciones1.pdf>
- 29 Roselia, M., Gómez Cedillos, J., & Rodriguez, V. M. (Diciembre de 2008). *DETERMINACION DE LA CONCENTRACION DE FLUOR EN LECHE*. Recuperado el 5 de Marzo de 2016, de Repositorio Institucional UES: <http://ri.ues.edu.sv/>
- 30 Sanfeliú, M. B. (Junio de 2001). *Determinacion de la calidad de agua de consumo humano de las familias rurales: estudio socioeconmico*. FUSADES. Obtenido de <http://www.fusades.com.sv>: [http://fusades.org/sites/default/files/investigaciones/boletin\\_economico\\_y\\_social\\_no\\_187\\_determinacion\\_de\\_la\\_calidad\\_de\\_agua\\_de\\_consumo\\_humano\\_de\\_las\\_familias\\_rurales\\_\\_estudio\\_socioeconomico.pdf](http://fusades.org/sites/default/files/investigaciones/boletin_economico_y_social_no_187_determinacion_de_la_calidad_de_agua_de_consumo_humano_de_las_familias_rurales__estudio_socioeconomico.pdf)
- 31 Superintendencia, d. S. (Julio de 2007). *Manual de metodos de ensayo para agua potable*. Obtenido de SUPERINTENDENCIA DE SERVICIOS SANITARIOS DIVISION DE FISCALIZACION: [http://www.siss.gob.cl/577/articles-9648\\_recurso\\_1.pdf](http://www.siss.gob.cl/577/articles-9648_recurso_1.pdf)

- 32 Universidad de Almeria . (2015). *Fundamentos de materiales* . Obtenido de <http://www.ual.es/>: <http://www.ual.es/~mjgarcia/practical>
- 33 Valenzuela, L., Ramírez Hernández, J., Sol, J., & Reyes, J. (15 de octubre de 2010). *Alternativas para la eliminación doméstica de fluor en el agua de consumo humano*. Obtenido de EBSCOHOST: <http://web.b.ebscohost.com/>
- 34 Valenzuela, L., Ramírez Hernández, J., Sol, J., & Reyes, J. (octubre de 2010). *Alternativas para la Eliminación Doméstica de Fluor en agua de consumo humano*. Obtenido de Información Tecnológica: [www.infotec.cl](http://www.infotec.cl)
- 35 Van Halem, D. (2015). *Groundwater treatment*. Obtenido de CTB335x - Introduction to water treatment: <https://courses.edx.org>
- 36 Vázquez Alvarado, P., Hernández Ceruelos, A., & Muñoz Juárez, S. (junio de 2016). *Fluoruros, Medio Ambiente y Salud*. Obtenido de Revista de cooperación: <http://www.revistadecooperacion.com/numero9/e-01.pdf>
- 37 WHO. (2002). *Fluorides*. Obtenido de Environmental Health Criteria 227: [http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/42415/1/WHO\\_EHC\\_227.pdf](http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/42415/1/WHO_EHC_227.pdf)

# ANEXOS

# **Anexo 1.**

**Carta de la Asociación de Desarrollo Comunal del Caserío  
Escamil dirigida a la Escuela de Ingeniería Química e Ingeniería  
de Alimentos**

Escuela de ingeniería química e ingeniería  
En alimentos universidad de el Salvador

Reciba un cordial y sincero saludo de parte del comité de ADESCO del Cantón Santa Rosa Caserío El Escamil, destacando éxitos en sus labores que a diario realiza.

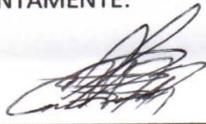
El motivo de la presente es para informarle que como comunidad estamos muy interesados en que se realice un estudio de remoción de flúor en un pozo ubicado en nuestra comunidad. Ya que aproximadamente siete años no podemos utilizar el agua para tomarla.

Dicho pozo fue construido veinte y cinco años atrás por ANDA, desde ese tiempo consumimos y utilizábamos el agua para las necesidades del hogar y el consumo de nuestras plantas y animales. En el dos mil nueve la unidad de salud exigió a la comunidad llevar acabo un análisis físico químico para ver la concentración del flúor ya que en los niños presentaban manchas amarías en los dientes.

Los análisis mostraron que los niveles del flúor eran sumamente altos, y no era apta para tomarla por todos los efectos que este mineral ocasiona al ser humano, por lo que se nos obliga a seguir utilizando el agua para bañarnos, lavar, lavar platos, para regar las plantas y darle de beber a los animales, lo cual se nos toca acarrear el agua desde el pueblo de agua Caliente la cual no todas las familias tenemos la facilidad de transportarla muchos a un siguen tomando de esa agua.

En espera de una respuesta satisfactoria nos despedimos de usted de antemano darle las gracias por su tiempo prestado le deseamos un fructuoso día y que dios le de mucha sabiduría.

ATENTAMENTE:

F   
\_\_\_\_\_



Carlos Rivera Hidalgo

Presidente de junta directiva (ADESCO Caserío El Escamil)

# **Anexo 2.**

**Resultado análisis de fluoruros, muestra de agua de pozo del  
Caserío Escamil, realizado por el Laboratorio Físicoquímico de  
Aguas, febrero 2016**



F - 09



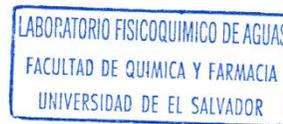
UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE QUÍMICA Y FARMACIA  
LABORATORIO FÍSICOQUÍMICO DE AGUAS

CODIGO N° 01-16		INFORME DE RESULTADOS			
Nombre y dirección del cliente: CARLOS ADALBERTO SANDOVAL BLANCO. URBANIZACION TIERRA NUESTRA CALLE PRINCIPAL, BLOCK 8 #17. APOPA.					Pág. 1 de 1
Descripción de muestra: AGUA DE POZO.					N° DE MUESTRAS: 1
Lugar de toma de muestra: CASERIO ESCAMIL, CANTON SANTA ROSA, MUNICIPIO AGUA CALIENTE. CHALATENANGO.					
Fecha de elaboración del informe: 09 DE FEBRERO DE 2016.					
Fecha de recepción de muestra: 01 DE FEBRERO DE 2016			Fecha de Análisis: 04 DE FEBRERO DE 2016.		
Parámetros	Método de Análisis	Identificación de la Muestra		Resultados	Norma CONACYT Agua Potable (2ª Actualización) NSO 13.07.01:08
		CODIGO LABORATORIO	CODIGO CLIENTE		
Fluoruros	Fotométrico	01-16	-----	4.7 mg/L	1.00 mg/l
Observaciones: - La toma de muestra estuvo a cargo del interesado. (Cuando aplique).					
Parámetros Acreditados en agua potable: pH, Conductividad, Hierro y Manganeseo.					

**Advertencia:** Los Resultados del informe solo se refieren a las muestras analizadas.

- NOTA:** - El informe de análisis sólo puede ser reproducido parcial o totalmente con la autorización escrita del laboratorio.  
 - Se especificara en observaciones, si la muestra fue tomada por el cliente o el laboratorio.  
 - El Laboratorio Físicoquímico de Aguas pone a su disposición la siguiente dirección electrónica para que reporte alguna no conformidad al servicio prestado: quejas.sgc.lfqa@gmail.com.

FECHA DE ENTREGA: 09 FEB 2016



*[Signature]*  
Lic. Henry Alfredo Hernández Contreras  
Jefe del Laboratorio Físicoquímico de Aguas  
y Analista

*[Signature]*  
Lic. Rosa Mirian Rivas de Lara  
Analista

ach\*

# **Anexo 3.**

**Requisitos de envases para muestras de agua.**

<b>Tipo II: Productos secundarios de desinfección</b>			
Monocloramina	P o V	En terreno 200 ml (análisis en lab.)	No requiere
Dibromoclorometano Bromodichlorometano Tribromometano Triclorometano	V/PTFE	100 ml	HCl, pH entre 1-2 unidades, además de 0,1 gr. de ácido ascórbico si hay cloro residual. (3)
<b>Tipo III: Elementos radiactivos</b> Determinado por la autoridad competente			
<b>Tipo IV : Físicos</b>			
Color verdadero	V	500 ml	No requiere
Olor	V	500 ml	No requiere, se debe llenar el envase
Sabor	V	500 ml	No requiere, se debe llenar el envase
<b>Tipo IV : Inorgánicos</b>			
Amoniaco	P	100 ml	$H_2SO_4$ , pH < 2
Cloruros	P o V	100 ml	No requiere
pH	P o V	En terreno 100 ml (análisis en lab.)	No requiere
Sulfatos	P o V	100 ml	No requiere
Sólidos disueltos totales	P o V	200 ml	No requiere
<b>Tipo IV : Orgánicos</b>			
Compuestos fenólicos	V	500 ml	$H_2SO_4$ , pH < 2
<b>Tipo V : Parámetros de desinfección</b>			
Cloro residual libre	Recolección directa No se usa envase	En terreno	No requiere
<p>(1): En algunos casos, como por ejemplo metales o parámetros físicos, con el volumen indicado en esta tabla, se pueden determinar todos los elementos que requieran de un mismo preservante.</p> <p>(2): Este volumen de solución neutraliza hasta 15 mg/L de cloro residual.</p> <p>(3): Alternativamente se puede usar tiosulfato de sodio como agente de cloro.</p> <p><b>Nota</b> – Si el método de ensayo establece alguna condición adicional, ésta debe ser considerada.</p>			
P	:	Polietileno de alta densidad.	
V	:	Vidrio neutro.	
P(A) o V (A)	:	Envase enjuagado con ácido nítrico 1+1.	
Va (S)	:	Vidrio neutro color ámbar, lavado con el mismo solvente utilizado para el ensayo.	
V/PTFE	:	Vidrio neutro, provisto de tapa rosca que disponga de septa de silicona recubierta de politetrafluoretileno.	

# **Anexo 4.**

**Requisitos de tiempo máximo de almacenamiento y condiciones de preservación de muestras**

Parámetros	Tiempo máximo de almacenamiento (1)	Condiciones de preservación (2)
<b>Tipo I: Bacteriológicos y turbiedad</b>		
Coliformes totales <i>Escherichia coli</i>	20 horas (3)	Mantener muestras bacteriológicas refrigeradas durante el transporte, a $T^{\circ} \leq 10^{\circ} C$ evitando el congelamiento. Una vez recibidas en laboratorio refrigerar entre $1-4^{\circ} C$ , salvo si se analizan inmediatamente.
<b>Turbiedad</b>	analizar a la brevedad, máx. 20 horas	refrigeración
<b>Tipo II :Elementos esenciales</b>		
Cobre	1 mes	pH < 2
Cromo total	1 mes	pH < 2
Fluoruro	28 días	refrigeración
Hierro	1 mes	pH < 2
Magnesio	1 mes	pH < 2
Manganeso	1 mes	pH < 2
Selenio	1 mes	pH < 2
Cinc	1 mes	pH < 2
<b>Tipo II:Elementos no esenciales</b>		
Arsénico	1 mes	pH < 2
Cadmio	1 mes	pH < 2
Cianuro	analizar a la brevedad, máx.14 días	pH > 12 refrigeración y oscuridad
Mercurio	1 mes	pH < 2
Nitrato	24 horas	refrigeración
	48 horas	refrigeración y agregar 2 ml. de $H_2SO_4$
Nitrito	analizar a la brevedad, máx 48 horas	refrigeración
Plomo	1 mes	pH < 2
<b>Tipo II :Sustancias orgánicas</b>		
Tetracloroetano	analizar a la brevedad, máx 7 días	pH 1- 2 y refrigeración
Benceno -Tolueno - Xilenos	analizar a la brevedad, máx 7 días	pH 1- 2 y refrigeración
<b>Tipo II : Plaguicidas</b>		
DDT+ DDD+ DDE Lindano Metoxicloro	72 horas	refrigeración y agente decolorante
2,4 D Pentaclorofenol	72 horas	refrigeración y agente decolorante

<b>Tipo II: Productos secundarios de desinfección</b>		
Monocloramina	analizar a la brevedad, máximo 24 horas <sup>2</sup> Los servicios de agua potable que presenten amoníaco como parámetro crítico, deberán analizar en terreno, antes de 15 min.	refrigeración
Dibromoclorometano Bromodichlorometano Tribromometano Triclorometano	analizar a la brevedad, máx 7 días	pH 1- 2 y refrigeración
<b>Tipo III:Elementos radiactivos</b> Determinado por la autoridad competente		
<b>Tipo IV : Físicos</b>		
Color verdadero	24 horas	refrigeración
Olor	24 horas	refrigeración
Sabor	24 horas	refrigeración
<b>Tipo IV : Inorgánicos</b>		
Amoníaco	7 días	pH < 2 y refrigeración
Cloruros	28 días	refrigeración
pH	de inmediato	en terreno Si en algún caso particular, se determina en laboratorio, debe informarse como tal.
Sulfatos	28 días	refrigeración
Sólidos disueltos totales	de preferencia 24 horas, máximo 7 días	refrigeración
<b>Tipo IV :Orgánicos</b>		
Compuestos fenólicos	28 días	pH < 2 y refrigeración
<b>Tipo V : Parámetros de desinfección</b>		
Cloro residual libre	de inmediato	en terreno
<p>(1): El requisito se verifica si se registra fecha y hora de recolección, además de fecha y hora de análisis.</p> <p>(2): Refrigeración de muestras para ensayos F-Q, durante el transporte o almacenamiento en laboratorio <math>4 \pm 2^{\circ}\text{C}</math>, evitando el congelamiento.</p> <p>(3): En casos calificados por la autoridad competente, se podrá aceptar máximo 30 hrs., indicando condiciones de transporte.</p> <p><b>Nota:</b> Si el método de ensayo establece alguna condición adicional, esta debe ser considerada.</p>		

# **Anexo 5.**

**Manual de prácticas de laboratorio**

	<p><b>Propuesta de un sistema de tratamiento para disminuir fluoruros del agua del pozo del caserío Escamil, cantón Santa Rosa, Agua Caliente, Chalatenango</b></p>	01
	<p>Calibración y medición con el medidor de fluoruros ExStick FL700</p>	
<p><b>Objetivo:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Calibrar de manera precisa el medidor de fluoruros ExStick FL700</li> <li>➤ Realizar la medición de fluoruros en muestras de agua utilizando el ExStick FL700</li> </ul>		
<p><b>Marco Teórico:</b></p> <p>Calibración: es el proceso de comparar los valores obtenidos por un instrumento de medición con la medida correspondiente de un patrón de referencia (o estándar).</p> <p>Proceso de calibración: El proceso de calibración se inicia con el diseño del instrumento de medida que ha de ser calibrado. El diseño tiene que ser capaz de "soportar la calibración" a través de su intervalo de calibración</p> <p>Medición: es un proceso básico de la ciencia que consiste en comparar un patrón seleccionado con el objeto o fenómeno cuya magnitud física se desea medir para ver cuántas veces el patrón está contenido en esa magnitud</p> <p>Medidor de fluoruros ExStick FL700: es un sistema diseñado específicamente para la medición rápida y precisa de iones de flúor en el agua potable y otras muestras acuosas.</p> <p>Tabletas TISAB: Tablet de Buffer de Ajuste Iónico Total para usar con el fluorímetro de ExStik</p>		
<p><b>Material y equipo:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Medidor de fluoruros ExStick FL700</li> <li>Tabletas TISAB</li> <li>Beaker</li> <li>Frasco de muestra</li> <li>Agua destilada</li> <li>Papel toalla</li> </ul>		

**Procedimiento de calibración:**

El FL700 puede calibrarse en 4 diferentes puntos de calibración. 0.5, 1.0, 5.0 o 10 ppm de ión fluoruro. El siguiente procedimiento de calibración proporciona el punto de calibración de 10 ppm como ejemplo, para los otros puntos se realiza igual operación.

1. Definir en el modo ppm y se apaga el medidor FL700.
2. Preparar una solución estándar de fluoruro de 10 ppm y colocar una tableta de TISAB en un frasco de muestra y luego se debe añadir 20 ml del estándar de fluoruro de 10 ppm al frasco de muestra.
3. Preparar una solución de enjuague que se utilizara entre las mediciones de muestras disolviendo 1 tableta TISAB en 20 ml de agua destilada. La solución de enjuague promueve tiempos de respuesta más rápidos.
4. Enjuagar el electrodo del FL700 en esta solución de enjuague y luego se seca minuciosamente con un pañuelo de papel.
5. Colocar el FL700 en el estándar de 10 ppm preparado y encender el instrumento con el botón ENCENDIDO/APAGADO. El instrumento ejecutara la auto-calibración.
6. El instrumento entrara en el modo HOLD en unos 35 segundos cuando se haya estabilizado en la solución estándar de 10 ppm.
7. Mantener presionada la tecla CAL, cal, aparecerá en la pantalla seguido de 0.5 ppm y luego 5.0 ppm. Se mantendrá pulsado el botón CAL hasta 10 ppm y CAL aparecen en la pantalla. Se soltará la tecla CAL.
8. Se espera hasta que la pantalla deje de destellar; el instrumento entrará en el modo de medición normal.
9. El instrumento estará calibrado y listo para su uso.
10. La H en un círculo en la pantalla indicará que la gama alta (H) ha completado la calibración.
11. Si desea calibrar la gama baja, obtener 0.1 ppm o 0.5 ppm de estándar de flúor y se repite el procedimiento de calibración ajustando el punto de calibración para la correcta configuración de ppm (0.1 o 0.5 ppm) en el paso 6.

**Procedimiento de medición:**

1. Medir en el frasco para muestras 20 ml de agua, añadiendo una tableta TISAB a la muestra de concentración de flúor desconocida.

2. Disolver una tableta TISAB en la muestra de agua y agitar el frasco para muestras hasta homogenizar.
3. Una vez calibrado el exstik FL700 limpiar completamente el extremo del electrodo utilizando agua destilada o solución de enjuague antes de realizar la medición.
4. Colocar el electrodo del FL700 en la muestra de agua preparada con el TISAB.
5. Revisar si el instrumento se encuentra en modo RETENCIÓN (hold), presionar el boton MODO/HOLD para desbloquear RETENCIÓN 4. Esperas hasta que el instrumento indique el valor de la concentración de fluor en el agua.

Nota: Presionar el botón MODO / HOLD durante 3 segundos para guardar las lecturas en la memoria. En la etapa de pruebas de efectividad de remoción de fluoruros mediante las pruebas de jarras se utilizó solución TISAB preparada en una relación 1:1 con cada muestra analizada en lugar de utilizar tabletas TISAB.

**Referencias bibliográficas:** FLIR SYSTEMS, INC. (2016). www.extech.com. Recuperado el 18 de Mayo de 2016, de www.extech.com:

[http://translate.extech.com/instruments/resources/manuals/FL700\\_UM-es.pdf](http://translate.extech.com/instruments/resources/manuals/FL700_UM-es.pdf)

<http://www.extech.com.es/instruments/product.asp?catid=73&prodid=462>

	<b>Propuesta de un sistema de tratamiento para disminuir fluoruros del agua del pozo del caserío Escamil, cantón Santa Rosa, Agua Caliente, Chalatenango</b>	02
	Preparación de una soluciones de hidróxido de sodio	
<p><b>Objetivo:</b> Preparar soluciones de hidróxido de sodio 6 M para ser utilizada en la preparación del hueso bovino fresco.</p>		
<p><b>Marco Teórico:</b></p> <p>Componentes y tipos de soluciones.</p> <p>Los componentes de una solución son el soluto y el solvente. El soluto se encuentra en menor cantidad dentro de la solución y es la fase de menor proporción. Es la sustancia que se disuelve hasta un tamaño de magnitud atómico, molecular o iónico de (<math>10^{-8}</math> a <math>10^{-7}</math> cm). El solvente es la sustancia que disuelve al soluto, se encuentra en mayor cantidad y es la fase de mayor proporción.</p> <p>Concentración de una solución</p> <p>Cuando se habla de concentración, esto indica la cantidad de soluto disuelto en una determinada cantidad de solvente, y puede ser expresada en términos Cualitativos y Cuantitativos.</p> <p>Unidades físicas y químicas.</p> <p>La relación entre soluto y solvente se expresa generalmente en partes de soluto en peso o volumen, por cada 100 partes en peso o volumen de solvente o de solución y existen cuatro modos de expresar la concentración utilizando unidades de medida, propias de las teorías químicas, en tres de ellas se utiliza el mol como unidad (molaridad M, molalidad m y fracción molar X) y en la última se utiliza el peso equivalente como unidad de concentración (normalidad N).</p> <p>Molaridad:</p> <p>La molaridad describe la relación entre los moles de un soluto y el volumen de una solución. Para calcular la molaridad, puedes empezar con los moles y el volumen, la masa y el volumen o los moles y los mililitros.</p>		

**Material y equipo:**

1 Beaker de 1 L  
1 Vidrio reloj  
1 Agitador de vidrio  
1 Pizeta  
1 Espátula  
1 Matraz aforado de 50 mL  
1 Embudo  
1 Matraz aforado de 1 L  
Reactivos:  
Hidroxido de sodio  
Agua destilada

**Procedimiento:**

1. Prepara 1 L de disolución de NaOH 6 M. Calculando la cantidad de sólido necesario, en gramos a utilizar.
2. Pesar 240 gramos de hidróxido de sodio en la balanza utilizando un vidrio reloj y una espátula.
3. transferir a un beaker de 1 L, enjuagando el vidrio reloj con agua destilada sobre el beaker para recoger el sólido que pudiera haber quedado adherido a él.
4. Añadir agua destilada hasta un volumen aproximadamente la mitad del volumen final.
5. Agitar hasta que el sólido este disuelto utilizando un agitador de vidrio.
6. Verter la disolución obtenida mediante un embudo, en el matraz aforado de 1 L.
7. Enjuagar el vaso con pequeñas porciones de agua destilada, que se van añadiendo al matraz aforado.
8. Finalmente se completa con agua destilada hasta el volumen deseado (enrase del matraz). Se colocará el tapón y se agitará, invirtiéndolo varias veces, para conseguir homogeneizar la disolución.
9. Preparar 9 litros de solución de NaOH 6 M, que serán utilizados en la preparación del hueso fresco.

**Ecuaciones utilizadas:**

- $Molaridad = \frac{\text{moles de soluto}}{\text{litros de solución}}$

**Referencias bibliográficas:**

	<b>Propuesta de un sistema de tratamiento para disminuir fluoruros del agua del pozo del caserío Escamil, cantón Santa Rosa, Agua Caliente, Chalatenango</b>	03
	Preparación de estándares de fluoruro	
<p><b>Objetivo:</b> Preparar estándares de fluoruros para 1, 5 y 10 ppm para ser utilizados en la calibración del medidor de fluoruros FL700.</p>		
<p><b>Marco Teórico:</b>          Estándar primario: es un compuesto de alta pureza que sirve como material de referencia en los métodos volumétricos de titulación.</p> <p>Esta sustancia debe cumplir con una serie de requerimientos:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Alta pureza (más de 99 %)</li> <li>2. Debe ser estable al aire</li> <li>3. Ausencia de agua de hidratación para evitar variaciones con los cambios de humedad el ambiente</li> <li>4. Fácilmente obtenible a costo moderado</li> <li>5. Razonable solubilidad en el medio de titulación</li> <li>6. Masa molar relativamente alta para minimizar los errores asociados con su pesada: si la masa molar es alta, se necesitará mayor masa para obtener la cantidad necesaria en moles.</li> </ol> <p>Solución estándar o solución patrón: Es una solución que se prepara para utilizarla como patrón en métodos volumétricos.</p> <p>Las propiedades deseables en una solución patrón son las siguientes:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Suficientemente estable en el tiempo para determinar su concentración una vez (no se necesita determinar nuevamente su concentración cada vez que se utilice)</li> <li>2. Reacción rápida con el analito</li> <li>3. Reacción más o menos completa para alcanzar el punto final</li> <li>4. Reacción con el analito por medio de una reacción selectiva que pueda ser descrita por una ecuación química balanceada.</li> </ol> <p>Las soluciones estándar se pueden preparar por:</p>		

1. Pesada directa de un patrón primario y dilución a un volumen conocido en un balón volumétrico. En este caso se denomina solución patrón primario, como es el caso de la solución de ftalato ácido de potasio.

2. Cuando no se dispone de un patrón primario, se prepara esta solución y luego se estandariza contra un estándar primario. En este caso se le denomina solución patrón secundario, como es el caso de una solución de ácido clorhídrico.

**Material y equipo:**

- 1 Balanza analítica
- 1 Vidrioreloj
- 1 Espatula
- 1 Pizeta
- 1 Balón volumétrico de 250 mL
- 3 Balones volumétricos de 100 mL
- 1 Pipeta volumétrica de 20 mL
- 1 Pipeta volumétrica de 10 mL
- 1 Pipeta volumétrica de 2 mL
- 1 Agitador de vidrio
- 1 beaker de 100 mL

**Reactivos:**

- Fluoruro de sodio pureza del 99.9 %
- Agua desionizada

**Procedimiento:**

Prepara 3 soluciones de NaF de 100 ml cada una (1ppm, 5ppm y 10 ppm). Ya que en la planta piloto solo se tienen balanzas analíticas de 4 unidades significativas, No es posible pesar las cantidades necesarias para su preparación directa, por lo que se debe prepara una solución de mayor concentración y posteriormente diluir a conveniencia.

**Preparación de la solución de 50 ppm**

1. Realizar los cálculos para la obtención de la masa a medir de NaF.
2. Se pesaron 0.2002 gramos de NaF en un vidrio reloj con la balanza analítica.
3. Se diluyó en un beaker de 100 mL agregando poca agua desionizada y agitando cuidadosamente

4. Se aforó a 250 mL en balón volumétrico y se homogenizó.

5. Almacenar en un recipiente de plástico y refrigerar

#### **Preparación de la solución de 10 ppm**

1. Realizar los cálculos para determinar el volumen a diluir para alcanzar la concentración deseada

Concentración 1 (C1) = 10 ppm

Volumen 1 (V1) = 100 ml

Concentración 2 (C2) = 50 ppm

V2 = ?

$V_1C_1 = V_2C_2$

$(100 \text{ mL})(10 \text{ ppm}) = (V_2)(50 \text{ ppm})$

$(1000 \text{ mLppm})/50 \text{ ppm} = V_2$

V2 = 20 mL

2. Tomar con pipeta volumétrica 20 mL de solución concentrada y se agregar al balón aforado de 100 mL.

3. Aforar y homogenizar mediante inversión.

4. Almacenar la solución en un recipiente de plástico.

#### **Preparación de la solución de 5 ppm**

1. Realizar los cálculos para determinar el volumen a diluir para alcanzar la concentración deseada

Concentración 1 (C1) = 5 ppm

Volumen 1 (V1) = 100 ml

Concentración 2 (C2) = 50 ppm

V2 = ?

$V_1C_1 = V_2C_2$

$(100 \text{ mL})(5 \text{ ppm}) = (V_2)(50 \text{ ppm})$

$(500 \text{ mLppm})/50 \text{ ppm} = V_2$

V2 = 10 mL

2. Medir con pipeta volumétrica 10 mL de solución concentrada y se agregaron a balón aforado de 100 mL.

3. Aforar y se homogeneizó mediante inversión.

4. Almacenar la solución en un recipiente de plástico.

#### **Preparación de la solución de 1 ppm**

1. Realizar los cálculos para determinar el volumen a diluir para alcanzar la concentración deseada

Concentración 1 (C1) = 1 ppm

Volumen 1 (V1) = 100 ml

Concentración 2 (C2) = 50 ppm

V2 = ?

$V_1C_1 = V_2C_2$

(100 mL) (1 ppm) = (V2) (50 ppm)

(100 mLppm)/50 ppm = V2

V2 = 2 mL

2. Medir con pipeta volumétrica 2 mL de solución concentrada y se agregaron a balón aforado de 100 mL.

3. Aforar y se homogenizar mediante inversión.

4. Almacenar la solución en un recipiente de plástico.

#### **Cálculos:**

##### **Solución de 50 mg/L**

50 ppm = 50 mg/L

Volumen = 250 ml

Masa de soluto = ?

$Ppm = mg \text{ soluto} / L \text{ solución}$

Mg soluto = 50 mg/L \* 0.25 L = 200 mg

Masa de NaF = 0.2g/%pureza

Ejemplo %pureza = 99.9%

Masa de NaF = 0.2g/0.999 = 0.2002

##### **Dilución de soluciones**

$V_1C_1 = V_2C_2$

**Referencias bibliográficas:**

Luzardo, M. (2011). <https://analiticaunexpo.files.wordpress.com/2011/11/volumetria.pdf>.

Recuperado el 22 de septiembre de 2016, de

<https://analiticaunexpo.files.wordpress.com/2011/11/volumetria.pdf>



**Propuesta de un sistema de tratamiento para disminuir fluoruros del agua del pozo del caserío Escamil, cantón Santa Rosa, Agua Caliente, Chalatenango**

04

Preparación del hueso fresco a través de tratamiento químico.

**Objetivo general:**

Preparar el hueso de bovino fresco a través de tratamiento químico para comprobar su efectividad en la remoción de fluoruros.

**Objetivos específicos:**

- Realizar el tratamiento de remoción de grasa y carne remanente de los huesos de vaca frescos.
- Llevar a cabo operaciones de secado del hueso para la eliminación de humedad.
- Realizar operaciones de reducción de tamaño de acuerdo a la granulometría requerida.

**Material y equipo:**

- 2 Hot plate
- 4 Beaker de 2L
- 2 Espátulas grandes
- 1 Termómetro
- 3 Agitadores
- 2 frascos lavador
- 2 Matraz volumétrico aforado de 500 mL
- 2 Pinzas
- 3 Beaker de 100 mL
- 2 Pipeta graduadas o volumétricas de 25mL
- 1 Pera de seguridad
- 3 Pares de guantes

3 Gafas de seguridad.

### **Reactivos**

Hidróxido de sodio 400 g

Ácido clorhídrico diluido

Agua destilada

### **Procedimiento:**

Etapa de desengrasado

1. Colocar el hueso en un beaker de 2 litros hasta llenar las dos terceras partes del recipiente tal como se muestra en la figura 1.



Figura 1. Hueso bovino fresco

2. Agregar solución de soda caustica 6 M al hueso hasta cubrirlo completamente.

3. Colocar el beaker en el Hot plate y calentar durante 30 minutos a una temperatura no mayor de 50 °C.



Figura 2. Primer lavado de hueso bovino



Figura 3. Calentamiento del hueso bovino a 50°C

4. Luego se procede a decantar la soda del beaker en el recipiente para recolección de residuos.



Figura 4. Hueso bovino luego del primer lavado con Hidróxido de Sodio



Figura 5. Hidróxido de Sodio con remanentes de grasa

5. Repetir el proceso de los numerales anteriores hasta que ya no observe grasa en el hueso. Este proceso se debe repetir al menos 3 veces más después de la primera lavada con soda caustica debido a que se seguirá observando grasa en el hueso.

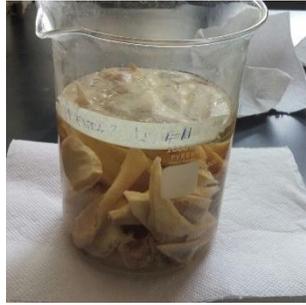


Figura 6. Segundo lavado de hueso con Hidróxido de Sodio.



Figura 7. Tercer lavado de hueso con Hidróxido de Sodio

6. Luego se debe poner el hueso en una bandeja limpia para poder hacer el procedimiento de neutralización, el cual consiste en lavar el hueso repetidamente con ácido clorhídrico diluido hasta neutralizar la soda caustica remanente, monitoreando este procedimiento con papel pH, hasta que el hueso alcance un pH entre 7 y 8.



Figura 8. Lavado de hueso con ácido clorhídrico.



Figura 9. Neutralización con ácido clorhídrico.



Figura 10. Primera verificación de neutralización con papel pH.



Figura 11. Segunda verificación de neutralización con papel pH.

7. El hueso ya neutralizado se deja reposar en agua destilada por un tiempo de dos horas.

### **Etapa de secado**

1. Colocar el hueso previamente desengrasado en bandejas.



Figura 12. Secado de hueso.

2. Secar las piezas del hueso a la intemperie durante un periodo de dos días para eliminar la mayor cantidad posible de humedad.

### **Etapa de reducción de tamaño**

1. Triturar las muestras de hueso con un molino manual hasta obtener el tamaño de partícula deseado (entre 0.5 y 3.35 mm).



Figura 13. Hueso triturado

2. Utilizar tamices para determinar el diámetro de las partículas de hueso molido.

3. Usar los tamices de malla 35 y malla 6, los cuales dan un tamaño de partícula de 0.5 mm y 3.35 mm respectivamente para obtener las partículas de hueso dentro del rango del tamaño deseado. Montar colocando un fondo de mallas, seguido de la malla 35 y posteriormente la malla 6, siendo el que quede entre las dos mallas el hueso a utilizar.

	<b>Propuesta de un sistema de tratamiento para disminuir fluoruros del agua del pozo del caserío Escamil, cantón Santa Rosa, Agua Caliente, Chalatenango</b>	05
	Preparación del hueso fresco a través de tratamiento térmico	
<p><b>Objetivo:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Preparar el hueso de bovino fresco a través de tratamiento térmico para comprobar su efectividad en la remoción de fluoruros.</li> <li>• Realizar el tratamiento de remoción de grasa, restos de tejido y humedad remanente de los huesos de vaca frescos mediante la aplicación de altas temperaturas.</li> <li>• Llevar a cabo operaciones de calcinado del hueso para diferentes temperaturas.</li> <li>• Realizar operaciones de reducción de tamaño de acuerdo a la granulometría requerida.</li> </ul>		
<p><b>Material y equipo:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>1 Mufla</li> <li>1 Estufa</li> <li>6 Platos de cerámica</li> <li>2 Pinzas metálicas</li> <li>2 Espátulas</li> <li>3 Pares de guantes de hule</li> <li>1 Par de guantes de asbesto</li> <li>3 Gafas de seguridad</li> <li>Papel aluminio</li> <li>3 Gabachas</li> <li>3 Mascarillas para gases</li> <li>Papel toalla</li> <li>Detergente</li> <li>Bandejas de aluminio</li> <li>1 Desecador</li> <li>1 Balanza digital</li> <li>Molino manual</li> </ul> <p><b>Reactivos</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Agua destilada.</li> </ul>		

**Procedimiento:**

**Etapa de remoción de grasa, restos de tejido y humedad**

1. Remover la mayor cantidad posible de material graso, restos de tejidos, medula y humedad del hueso de manera manual o con ayuda de cuchillos.



Figura 1. Hueso luego de la remoción de grasas y tejidos

2. Colocar el hueso en bandejas para introducir a la estufa para secarlo y desengrasarlo.



Figura 2. Hueso en estufa para secado

3. Calentar a una temperatura de 200 °C durante dos horas y observar la apariencia del hueso. Si el hueso se observaba sin humedad se procedía a retirar de la estufa, en caso contrario si se observaba grasoso se continuaba con el calentamiento



Figura 3. Hueso en estufa a temperatura de 200°C



Figura 4. Estufa utilizada

### **Etapa de calcinación**

1. Pesar con una balanza digital en una bandeja de aluminio 100 gr de cada muestra del hueso a calcinar.
2. Colocar el hueso desgrasado en un recipiente resistente a altas temperaturas para proceder a calcinarlo



Figura 5. Hueso desgrasado listo para calcinar

3. Encender la mufla con el hueso adentro y llevarlo a una temperatura de 100 °C, hasta que la temperatura en la mufla se estabilizara, luego se realizar el mismo proceso para 150 °C, 200 °C y así sucesivamente hasta 450 °C. Y se dejar calcinar un tiempo de una hora.



Figura 6. Temperaturas para realizar la calcinación del hueso

4. Retirar el hueso de la mufla utilizando guantes de asbesto, tomando las debidas precauciones para no tocar las superficies de la mufla que se encontraban a temperatura alta.

5. Para la determinación de la mejor temperatura de calcinación se realizar el calcinado con muestras de 100 gramos durante 1 hora para cada temperatura de: 450°C, 500°C, 550°C, 600°C y 650°C, siguiendo el mismo procedimiento del párrafo anterior.

6. Dejar enfriar cada muestra y colocarlas en bandejas de aluminio.



Figura 7. Hueso calcinado a 450 °C



Figura 8. Hueso calcinado a 500 °C



Figura 9. Hueso calcinado 550 °C

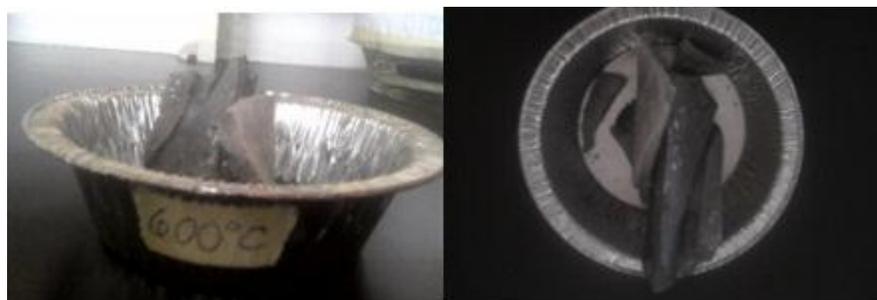


Figura10. Hueso calcinado a 600 °C



Figura 11. Hueso calcinado a 650 °C

7. El hueso calcinado debe guardarse en desecador.

### Etapa de reducción de tamaño

1. Triturar las muestras de hueso calcinado con un molino manual hasta obtener el tamaño de partícula deseado (entre 0.5 y 3.35 mm).



Figura 12. Procedimiento de reducción de tamaño del hueso

2. Utilizar los tamices de malla 35 y malla 6, los cuales dan un tamaño de partícula de 0.5 mm y 3.35 mm respectivamente para obtener las partículas de hueso dentro del rango del tamaño deseado. Montar colocando un fondo de mallas, seguido de la malla 35 y posteriormente la malla 6, siendo el que quedó entre las dos mallas el hueso a utilizar.



Figura 13. Procedimiento del tamizado entre malla 35 y malla 6



Figura 14. Hueso obtenido a partir del tamizado

3. Preservar el hueso para las pruebas de efectividad de remoción de flúor en recipientes dentro del desecador.

	<b>Propuesta de un sistema de tratamiento para disminuir fluoruros del agua del pozo del caserío Escamil, cantón Santa Rosa, Agua Caliente, Chalatenango</b>	06
	Pruebas de efectividad de remoción de fluoruros	
<p><b>Objetivo General:</b></p> Realizar prueba de jarras para determinar el método más eficiente de reducción de fluoruros entre el hueso molido fresco y hueso molido calcinado a distintas temperaturas. <p><b>Objetivos específicos</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Determinar experimentalmente temperatura a la cual se obtiene mejor efectividad en la remoción de fluoruros.</li> <li>➤ Comparar efectividad de cada muestra de hueso sin calcinar y calcinado a distintas temperaturas.</li> </ul>		
<p><b>Marco Teórico:</b></p> <p><b>Pruebas de jarras:</b></p> La prueba de jarras es un procedimiento común de laboratorio para determinar las condiciones óptimas de funcionamiento para el agua o el tratamiento de aguas residuales. Este método permite realizar ajustes en el pH, las variaciones en la dosis de coagulante o polímero, alternando velocidades de mezclado, a pequeña escala con el fin de predecir el funcionamiento de una operación a gran escala de tratamiento. <p>Aplicaciones:</p> <p>Determinación de los agentes floculantes para lograr óptima sedimentación en el diseño de mezclas para el tratamiento de agua potable.</p> <p>Evaluación de la eficacia de un absorbente sobre agentes tóxicos.</p> <p>Optimización de la adición de coagulantes y polielectrolitos para el tratamiento de aguas residuales y agua.</p> <p>Prueba de laboratorio con diferentes dosis químicas, gradiente de velocidad y tiempo de decantación para estimar la dosis y concentración óptima de coagulante requerida para alcanzar los objetivos de calidad del agua.</p>		
<p><b>Material y equipo:</b></p> Equipo de prueba de jarras		

5 Beakers de 1 L

1 Matraz volumétrico aforado de 500 mL

1 Balanza digital

Bandejas de aluminio

1 Espátula

1 Frasco lavador

1 Medidor de fluoruro ExStik FL700

**Procedimiento:**

**Etapas de pruebas de efectividad de remoción de flúor**

1. Calibrar el medidor de fluoruros utilizando las soluciones estándar ver anexo 01.
2. Determinar con el medidor de fluoruros la concentración inicial de fluoruros a una muestra de agua de pozo.



Figura 1. Primera medición de Fluoruros de la muestra de agua de pozo con el medidor de fluoruro ExStik FL700

2. Pesar con bandejas de aluminio 50 gramos de cada muestra de hueso calcinado a distintas temperaturas (450°, 500°, 550°, 600° y 650° C), en balanza digital.



Figura 2. Muestras tamizadas de hueso en sus respectivas temperaturas de calcinación



Figura 3. Muestras tamizadas de hueso en sus respectivas temperaturas de calcinación (450°C, 500 °C, 550 °C, 600 °C y 650 °C).

3. Medir en un matraz volumétrico aforado de 500 mL agua proveniente del pozo, 5 veces.

4. Colocar las muestras de 50 g de hueso calcinado a distintas temperaturas en beakers de 1L y se agregar lentamente el agua del pozo previamente medida (este proceso se debe realizar para cada muestra de hueso calcinado a diferentes temperaturas).



Figura 4. Muestras de 50g de hueso calcinado en beaker para prueba de jarras

5. Colocar los beakers conteniendo el hueso en contacto con agua del pozo en el equipo de prueba de jarras y proceder a encenderlo, manteniendo constantes la velocidad de agitación y el tiempo de contacto.

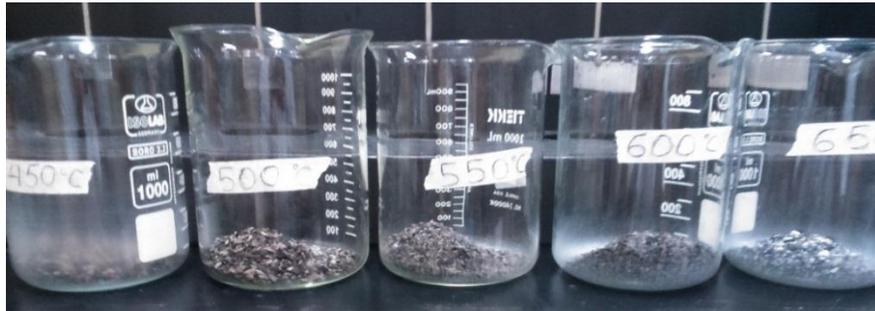


Figura 5. Prueba de jarra con las muestras de 50 g de hueso calcinado a sus diferentes temperaturas en contacto con agua de pozo

6. Realizar una medición de la concentración de fluoruros para cada muestra de agua que este en contacto con el hueso calcinado a distintos tiempos: 5, 15, 30, 45, 60 y 75 minutos.



Figura 6. Medición de la concentración de fluoruros de muestras de agua en contacto con hueso, calcinado a distintas temperaturas, a distintos tiempos.

7. Calcular la eficiencia de reducción de fluoruros para cada muestra de hueso en el momento donde se obtuvo la mayor remoción de fluoruros.
8. Repetir el mismo procedimiento para 3 muestras de hueso molido fresco sin calcinar.



Figura 7. Realización de prueba de jarras a muestras de hueso molido sin calcinar

11. Luego de haber realizado la prueba de jarras con el hueso fresco molido se podrá observar que el agua tratada presentará residuos grasosos que le dan un aspecto blanquecino, como se muestra a continuación.



Figura 8. Muestra de agua de pozo tratada con hueso molido sin calcinar.

#### **Ecuaciones utilizadas:**

$$\text{efectividad de remoción} = \frac{\text{iones fluoruros iniciales} - \text{iones fluoruros finales}}{\text{iones fluoruro iniciales}} * 100$$

$$\text{Eficiencia de remoción} = \frac{C_i - C_f}{C_i} * 100\%$$

Donde,  $C_i$  = Concentración inicial

$C_f$  = Concentración final en cada tiempo de cada muestra

$$\text{Eficiencia de remoción} = \frac{C_i - C_f}{C_i} * 100\%$$

Donde,  $C_i$  = Concentración inicial (5.1)

$C_f$  = Concentración final en cada tiempo de cada muestra

#### **Referencias bibliográficas**



**Propuesta de un sistema de tratamiento para disminuir fluoruros del agua del pozo del caserío Escamil, cantón Santa Rosa, Agua Caliente, Chalatenango**

07

Elaboración del sistema de remoción para la prueba preliminar.

**Objetivo General:**

Elaborar un sistema de tratamiento de agua a nivel de laboratorio para disminuir fluoruros hasta una concentración menor a 1 mg/L

**Objetivos específicos**

- Preparar hueso bovino calcinado a 450 °C para ser utilizado en el sistema de tratamiento.
- Agregar materiales complementarios al sistema para el tratamiento del agua potable.

**Material y equipo:**

3 recipientes con tapadera  
Tubo PVC de ½ pulgada  
Chorro con empaques  
Red sintética de 1 mm de diámetro  
Teflón  
Sellador para plásticos y PVC  
5 adaptadores machos de PVC  
5 adaptadores hembra de PVC  
Manguera  
Recipiente plástico con chorro como dispensador  
Algodón  
Cautín  
Sierra  
3 platos de cerámica  
1 Estufa  
1 Mufla  
2 Pinzas metálicas  
Guantes de hule  
Guantes de asbesto  
Papel aluminio

Bandejas de aluminio

Desecador

Balanza digital

Molino manual

Hueso bovino

Grava sílica

Arena sílica

Piedra pómez

Arena

Grava

Carbón activado

**Procedimiento:**

1. Con el cautín hacer orificios de ½ pulgada en los extremos superiores e inferiores de cada uno de los recipientes con tapadera para entrada y salida del agua.
2. Colocar los adaptadores machos y hembras en los orificios asegurándolos con teflón para evitar fugas de agua, al último recipiente con tapadera, en el orificio inferior colocarle un chorro con empaque.
3. Al colocarlos en los orificios asegurarlos con sellador de plástico y pvc.
4. Proceder a cortar con una sierra 6 cm de tubo de ½ pulgada de diámetro de pvc para unir los recipientes con tapadera a través de los adaptadores.
5. Elaborar 3 mallas circulares utilizando 5 capas de red sintética de 1 mm de diámetro cosiéndolas a una manguera para evitar las pérdidas de material.
6. Agregar las capas de materiales a cada recipiente con tapadera y luego proceder a realizar el experimento.

# **Anexo 6.**

**Resultado de análisis fisicoquímico de prueba preliminar,  
Laboratorio de Aguas de la Facultad de Química y Farmacia.**



F - 09



UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE QUÍMICA Y FARMACIA  
LABORATORIO FÍSICOQUÍMICO DE AGUAS

CODIGO N° 07-16		INFORME DE RESULTADOS			
Nombre y dirección del cliente: LUIS EDUARDO PACHECO. CALLE CONSTITUCION, PASAJE ARIES CASA # 25 M. SAN SALVADOR					Pág. 1 de 1
Descripción de muestra: AGUA DE POZO (TRATADA)				N° DE MUESTRAS: 1	
Lugar de toma de muestra: CASERIO ESCAMIL, AGUA CALIENTE DEPARTAMENTO DE CHALATENANGO.					
Fecha de elaboración del informe: JUEVES, 30 DE JUNIO DE 2016.					
Fecha de recepción de muestra: MARTES 28 DE JUNIO DE 2016			Fecha de Análisis: 28 Y 29 DE JUNIO DE 2016		
Parámetros	Método de Análisis	Identificación de la Muestra		Resultados	Norma CONACYT Agua Potable (2ª Actualización) NSO 13.07.01:08
		CODIGO LABORATORIO	CODIGO CLIENTE		
Color	Fotométrico	07-16	MUESTRA DE AGUA DE POZO, CASERIO ESCAMIL, AGUA CALIENTE. CHALATENANGO	24.8 Pt - Co	15 Pt - Co
Turbiedad	Fotométrico			1.34 UNT	5 UNT
<b>Observaciones:</b> - La toma de muestra estuvo a cargo del interesado. (Cuando aplique).					
<b>Parámetros Acreditados en agua potable: pH, Conductividad, Hierro y Manganeseo.</b>					
<b>Advertencia:</b> Los Resultados del informe solo se refieren a las muestras analizadas.					
<b>NOTA:</b> El informe de análisis sólo puede ser reproducido parcial o totalmente con la autorización escrita del laboratorio. Se especificara en observaciones, si la muestra fue tomada por el cliente o el laboratorio.					

FECHA DE ENTREGA: 12 JUL 2016

LABORATORIO FÍSICOQUÍMICO DE AGUAS  
FACULTAD DE QUÍMICA Y FARMACIA  
UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

  
Lic. Henry Alfredo Hernández Contreras  
Jefe del Laboratorio Físicoquímico de Aguas  
y Analista

  
Lic. María del Carmen Polio Martínez  
Analista

FIN DEL REPORTE

ack\*

Final Avenida "Mártires Estudiantes del 30 de julio", Ciudad Universitaria, San Salvador, El Salvador, C.A.  
Teléfono Directo: 2531-2948. Correo electrónico: labfqa\_ues@yahoo.com



F - 09



UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE QUÍMICA Y FARMACIA  
LABORATORIO FÍSICOQUÍMICO DE AGUAS

<b>CODIGO N° 06-16</b>		<b>INFORME DE RESULTADOS</b>			
<b>Nombre y dirección del cliente:</b> LUIS EDUARDO PACHECO. CALLE CONSTITUCION, PASAJE ARIES CASA # 25 M. SAN SALVADOR					Pág. 1 de 1
<b>Descripción de muestra:</b> AGUA DE POZO (TRATADA)					N° DE MUESTRAS: 1
<b>Lugar de toma de muestra:</b> CASERIO ESCAMIL, AGUA CALIENTE DEPARTAMENTO DE CHALATENANGO.					
<b>Fecha de elaboración del informe:</b> JUEVES, 30 DE JUNIO DE 2016.					
<b>Fecha de recepción de muestra:</b> LUNES 27 DE JUNIO DE 2016			<b>Fecha de Análisis:</b> 27 Y 28 DE JUNIO DE 2016		
Parámetros	Método de Análisis	Identificación de la Muestra		Resultados	Norma CONACYT Agua Potable (2ª Actualización) NSO 13.07.01:08
		CODIGO LABORATORIO	CODIGO CLIENTE		
Hierro Total*	Fotométrico	06-16	MUESTRA DE AGUA DE POZO, CASERIO ESCAMIL, AGUA CALIENTE. CHALATENANGO	NO DETECTADO	0.30 mg/L
Nitratos	Fotométrico			NO DETECTADO	45.00 mg/L
Sulfatos	Fotométrico			145.00 mg/L	400.00 mg/l
<b>Observaciones:</b> - La toma de muestra estuvo a cargo del interesado. (Cuando aplique).					
<b>Parámetros Acreditados en agua potable:</b> pH, Conductividad, Hierro y Manganeseo.					

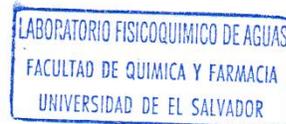
**Advertencia:** Los Resultados del informe solo se refieren a las muestras analizadas.

**NOTA:** El informe de análisis sólo puede ser reproducido parcial o totalmente con la autorización escrita del laboratorio.

Se especificara en observaciones, si la muestra fue tomada por el cliente o el laboratorio.

**FECHA DE ENTREGA:** \_\_\_\_\_

  
Lic. Henry Alfredo Hernández Contreras  
Jefe del Laboratorio Físicoquímico de Aguas  
y Analista



  
Lic. Rosa Miran Rivas de Lara  
Analista

  
Lic. María del Carmen Polio Martínez  
Analista

FIN DEL REPORTE

ael\*

Final Avenida "Mártires Estudiantes del 30 de julio", Ciudad Universitaria, San Salvador, El Salvador, C.A.  
Teléfono Directo: 2531-2948. Correo electrónico: labfqa\_ues@yahoo.com

# **Anexo 7.**

**Resultado de análisis fisicoquímico de prueba preliminar,  
Ecochem S.A. de C.V.**

San Salvador, 12 de Julio de 2016.

Señor.  
**Luis Pacheco**  
**Presente**

Reciba un cordial y atento saludo de parte de nuestra empresa, deseándole muchos éxitos en sus actividades diarias.

Según los análisis fisicoquímicos realizados a la muestra de agua se obtuvieron los siguientes resultados:

Análisis	Resultados
Total de solidos disueltos	345 ppm
Dureza total	50 ppm
pH	8.0
Conductividad	691.4 microsiemens

Sin más por el momento y esperando servirles como ustedes lo merecen.

Atentamente,



**Tec. Roberto Alejandro Marroquín**  
**Asesor Técnico – Tratamiento De Aguas**



# **Anexo 8.**

**Resultado de análisis fisicoquímico en agua de pozo de caserío Escamil, cantón Santa Rosa, Chalatenango, por Centro de Control de Calidad Industrial S.A. de C.V. en septiembre de 2011.**



# CENTRO DE CONTROL DE CALIDAD INDUSTRIAL, S.A. DE C.V.

Calle San Antonio Abad, Urb. Lisboa # 35, San Salvador. Tel.: 2284-0223 Telefax: 2284-5933  
ccci@navegante.com.sv www.ccci.com.sv

San Salvador, 1 de Octubre de 2011

N° de Solicitud: SA917	N° de Reporte: RA4302 Fco-Qco
---------------------------	----------------------------------

Datos de la Muestra	
Naturaleza	Agua de Proyecto Produce
Fecha de ingreso:	28/09/2011
Fecha de análisis:	28/09/2011 a 30/09/2011
Muestreado por:	Cliente

Datos del cliente	
Empresa:	ADECET
Responsable:	Carlos Alfredo Rivera
Dirección:	Canton Santa Rosa caserío el escamil agua caliente Chalatenango
Teléfono y Fax:	2309-5092
E-mail	carlosriverahidalgo@hotmail.com

## RESULTADOS DE ANALISIS

PARAMETROS ANALIZADOS	RESULTADOS	METODOS DE ANALISIS*	NORMA PARA AGUA POTABLE NSO 13.07.01:08 Límites Máximos Permisibles
Hierro Total mg/L	0.066	Standard Methods 3500-Fe B 21Ed 2005 Metodo Fenantrolina	0.30
Plomo mg/L	<0.010	Standard Methods, 3500-Pb, 21 Ed 2005. Metodo de Ditizona	0.01
Fosfatos Totales mg/L	<0.5	Colorimetrico	No especifica
Fluoruros mg/L	17.5	Colorimetrico	1.00

\*Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater - 21<sup>th</sup> Edition - 2005.

mg/L: miligramos por Litro

UNT: Unidades Nefelometricas de Turbidez Platino -Cobalto

NSO: Norma Salvadoreña Obligatoria

**CARACTERISTICAS DE LA MUESTRA:** Agua incolora con pequeñas partículas suspendidas, olor no perceptible.

Recibida en frasco de plástico.

**OBSERVACIONES:** El resultado de Fluoruros no cumple con lo establecido de la norma de referencia..

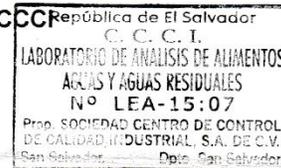
Los resultados del presente reporte corresponden en procedencia y código a la muestra indicada.

Por políticas de confidencialidad y derechos de autor, la reproducción total o parcial de este reporte debe ser autorizada por el laboratorio.

Atentamente,

**CENTRO DE CONTROL DE CALIDAD INDUSTRIAL S.A DE C.V. - CCCI**

*Sulma Yanira Reyes de Serpas*  
Dra. Sulma Yanira Reyes de Serpas.  
Directora Ejecutiva



El CCCI trabaja con un sistema de Calidad Implementado bajo la Norma NSR ISO /IEC 17025:2005 como parte de la garantía de calidad de nuestros análisis.

# **Anexo 9.**

**Resultado de análisis fisicoquímico de prueba final con valores óptimos, Laboratorio de Aguas de la Facultad de Química y Farmacia.**



F - 09



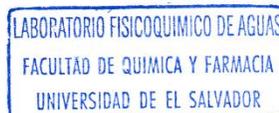
UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE QUÍMICA Y FARMACIA  
LABORATORIO FÍSICOQUÍMICO DE AGUAS

CODIGO N° 14-16		INFORME DE RESULTADOS			
Nombre y dirección del cliente: CARLOS ADALBERTO SANDOVAL BLANCO. URBANIZACION TIERRA NUESTRA CALLE PRINCIPAL, BLOCK 8 #17. APOPA.					Pág. 1 de 1
Descripción de muestra: AGUA DE POZO TRATADA					N° DE MUESTRAS: 1
Lugar de toma de muestra: CASERIO ESCAMIL, CANTON SANTA ROSA, MUNICIPIO AGUA CALIENTE. CHALATENANGO.					
Fecha de elaboración del informe: 17 DE OCTUBRE DE 2016.					
Fecha de recepción de muestra: 10 DE OCTUBRE DE 2016			Fecha de Análisis: 11 DE OCTUBRE DE 2016.		
Parámetros	Método de Análisis	Identificación de la Muestra		Resultados	Norma CONACYT Agua Potable (2ª Actualización) NSO 1.3.07.01:08
		CODIGO LABORATORIO	CODIGO CLIENTE		
COLOR	Fotométrico	14-16	-----	NO DETECTADO	15 Pt - Co
Observaciones: - La toma de muestra estuvo a cargo del interesado. (Cuando aplique).					

**Advertencia:** Los Resultados del informe solo se refieren a las muestras analizadas.

**NOTA:** - El informe de análisis sólo puede ser reproducido parcial o totalmente con la autorización escrita del laboratorio.  
- Se especificara en observaciones, si la muestra fue tomada por el cliente o el laboratorio.  
- El Laboratorio Físicoquímico de Aguas pone a su disposición la siguiente dirección electrónica para que reporte alguna no conformidad al servicio prestado: quejas.sgc.lfqa@gmail.com.

FECHA DE ENTREGA: 17 OCT 2016



  
Lic. Henry Alfredo Hernández Contreras  
Jefe del Laboratorio Físicoquímico de Aguas  
y Analista

  
Lic. Rosa Mirian Rivas de Lara  
Analista

FIN DEL REPORTE

act

Final Avenida "Mártires Estudiantes del 30 de julio", Ciudad Universitaria, San Salvador, El Salvador, C.A.  
Teléfono Directo: 2531-2948. Correo electrónico: labfqa\_ues@yahoo.com



F - 09



**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE QUÍMICA Y FARMACIA  
LABORATORIO FÍSICOQUÍMICO DE AGUAS**

CODIGO N° 15-16		INFORME DE RESULTADOS			
Nombre y dirección del cliente: CARLOS ADALBERTO SANDOVAL BLANCO. URBANIZACION TIERRA NUESTRA CALLE PRINCIPAL, BLOCK 8 #17. APOPA.					Pág. 1 de 3
Descripción de muestra: AGUA DE POZO TRATADA					N° DE MUESTRAS: 1
Lugar de toma de muestra: CASERIO ESCAMIL, CANTON SANTA ROSA, MUNICIPIO AGUA CALIENTE. CHALATENANGO					
Fecha de elaboración del informe: 17 DE OCTUBRE DE 2016					
Fecha de recepción de muestra: 10 DE OCTUBRE DE 2016			Fecha de Análisis: DEL 11 AL 14 DE OCTUBRE DE 2016		
Parámetros	Método de Análisis	Identificación de la Muestra		Resultados	Norma CONACYT Agua Potable (2ª Actualización) NSO 13.07.01:08
		CODIGO LABORATORIO	CODIGO CLIENTE		
Nitrato	Fotométrico	15-16	-----	NO DETECTADO	45.00 mg/L
<b>Observaciones:</b>					
- La toma de muestra estuvo a cargo del interesado. (Cuando aplique).					

**Advertencia:** Los Resultados del informe solo se refieren a las muestras analizadas.

- NOTA:**
- El informe de análisis sólo puede ser reproducido parcial o totalmente con la autorización escrita del laboratorio.
  - Se especificara en observaciones, si la muestra fue tomada por el cliente o el laboratorio.
  - El Laboratorio Físicoquímico de Aguas pone a su disposición la siguiente dirección electrónica para que reporte alguna no conformidad al servicio prestado: [quejas.sgc.lfqa@gmail.com](mailto:quejas.sgc.lfqa@gmail.com).



F - 09



UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE QUÍMICA Y FARMACIA  
LABORATORIO FÍSICOQUÍMICO DE AGUAS

CODIGO N° 15-16		INFORME DE RESULTADOS			
Nombre y dirección del cliente: CARLOS ADALBERTO SANDOVAL BLANCO. URBANIZACION TIERRA NUESTRA CALLE PRINCIPAL, BLOCK 8 #17. APOPA.					Pág. 2 de 3
Descripción de muestra: AGUA DE POZO TRATADA					N° DE MUESTRAS: 1
Lugar de toma de muestra: CASERIO ESCAMIL, CANTON SANTA ROSA, MUNICIPIO AGUA CALIENTE. CHALATENANGO					
Fecha de elaboración del informe: 17 DE OCTUBRE DE 2016					
Fecha de recepción de muestra: 10 DE OCTUBRE DE 2016			Fecha de Análisis: DEL 11 AL 14 DE OCTUBRE DE 2016		
Parámetros	Método de Análisis	Identificación de la Muestra		Resultados	Norma CONACYT Agua Potable (2ª Actualización) NSO 13.07.01:08
		CODIGO LABORATORIO	CODIGO CLIENTE		
Sulfatos	Fotométrico	15-16	-----	151 mg/L	400 mg/L
Observaciones: - La toma de muestra estuvo a cargo del interesado. (Cuando aplique).					

**Advertencia:** Los Resultados del informe solo se refieren a las muestras analizadas.

- NOTA:**
- El informe de análisis sólo puede ser reproducido parcial o totalmente con la autorización escrita del laboratorio.
  - Se especificara en observaciones, si la muestra fue tomada por el cliente o el laboratorio.
  - El Laboratorio Físicoquímico de Aguas pone a su disposición la siguiente dirección electrónica para que reporte alguna no conformidad al servicio prestado: [quejas.sgc.lfqa@gmail.com](mailto:quejas.sgc.lfqa@gmail.com).



F - 09



UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE QUÍMICA Y FARMACIA  
LABORATORIO FÍSICOQUÍMICO DE AGUAS

CODIGO N° 15-16		INFORME DE RESULTADOS			
Nombre y dirección del cliente: CARLOS ADALBERTO SANDOVAL BLANCO. URBANIZACION TIERRA NUESTRA CALLE PRINCIPAL, BLOCK 8 #17. APOPA.					Pág. 3 de 3
Descripción de muestra: AGUA DE POZO TRATADA					N° DE MUESTRAS: 1
Lugar de toma de muestra: CASERIO ESCAMIL, CANTON SANTA ROSA, MUNICIPIO AGUA CALIENTE. CHALATENANGO					
Fecha de elaboración del informe: 17 DE OCTUBRE DE 2016					
Fecha de recepción de muestra: 10 DE OCTUBRE DE 2016			Fecha de Análisis: DEL 11 AL 14 DE OCTUBRE DE 2016		
Parámetros	Método de Análisis	Identificación de la Muestra		Resultados	Norma CONACYT Agua Potable (2ª Actualización) NSO 13.07.01:08
		CODIGO LABORATORIO	CODIGO CLIENTE		
Turbiedad	Fotométrico	15-16	-----	0.33 UNT	5 UNT
<b>Observaciones:</b> - La toma de muestra estuvo a cargo del interesado. (Cuando aplique).					

**Advertencia:** Los Resultados del informe solo se refieren a las muestras analizadas.

- NOTA:** - El informe de análisis sólo puede ser reproducido parcial o totalmente con la autorización escrita del laboratorio.  
 - Se especificara en observaciones, si la muestra fue tomada por el cliente o el laboratorio.  
 - El Laboratorio Físicoquímico de Aguas pone a su disposición la siguiente dirección electrónica para que reporte alguna no conformidad al servicio prestado: quejas.sgc.ffqa@gmail.com.

FECHA DE ENTREGA: 17 OCT 2016



*Lic. Henry Alfredo Hernández Contreras*  
Jefe del Laboratorio Físicoquímico de Aguas  
y Analista

*Lic. Rosa Mirian Rivas de Lara*  
Analista

*Lic. María del Carmen Pofio Martínez*  
Analista

FIN DEL REPORTE

act

Final Avenida "Mártires Estudiantes del 30 de julio", Ciudad Universitaria, San Salvador, El Salvador, C.A.  
Teléfono Directo: 2531-2948. Correo electrónico: labfqa\_ues@yahoo.com

# **Anexo 10.**

**Resultado de análisis fisicoquímico de prueba final con valores óptimos, realizados por Ecochem S.A. de C.V.**

San Salvador, 14 de octubre de 2016.

Señor.  
**Luis Pacheco**  
**Presente**

Reciba un cordial y atento saludo de parte de nuestra empresa, deseándole muchos éxitos en sus actividades diarias.

Según los análisis fisicoquímicos realizados a la muestra de agua se obtuvieron los siguientes resultados:

<b>Análisis</b>	<b>Resultados</b>
Total de solidos disueltos	314.1 ppm
Dureza total	30 ppm
Alcalinidad parcial	10 ppm
pH	7.8
Conductividad	658.3 microsiemens

Sin más por el momento y esperando servirles como ustedes lo merecen.

Atentamente,



**Tec. Roberto Alejandro Marroquín**  
**Asesor Técnico – Tratamiento De Aguas**