

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE QUÍMICA
CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

Proyecto Final de Graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería
Ambiental

**“Propuesta de sistema de tratamiento para la reducción del contenido de Dureza
Total y Sulfato del agua en el acueducto de la ASADA Santa Cruz de Turrialba”**

Manuel Eduardo Sancho Vargas

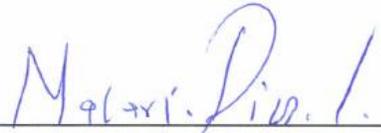
CARTAGO, febrero, 2019



“Propuesta de sistema de tratamiento para la reducción del contenido de Dureza Total y Sulfato del agua en el acueducto de la ASADA Santa Cruz de Turrialba”

Informe presentado a la Escuela de Química del Instituto Tecnológico de Costa Rica como requisito parcial para optar por el título de Ingeniero Ambiental con el grado de licenciatura

Miembros del tribunal



Ing. Macario Pino Gómez
Director



Ph.D. Federico Masis Meléndez
Lector 1



Dr. Rer. Nat. Ricardo Starbird Pérez
Lector 2



MSc. Diana Alexandra Zambrano Piamba
Coordinador COTRAFIG



Ph.D. Floría Roa Gutiérrez
Directora Escuela de Química



MSc. Ana Loreña Arias Zúñiga
Coordinadora Carrera de Ingeniería Ambiental

DEDICATORIA

A mi mamá y mi papá, por ser ese apoyo incondicional. Por ser esas personas maravillosas que me han dado su amor, por creer en mí y por tanto que me han ayudado en cada etapa de mi vida.

A mis hermanos Dayanna y Diego, por ser esas personitas especiales en mi vida.

A Daniela, por creer en mí desde un comienzo. Por dar lucecita durante todo este tiempo a mi lado y darme todo su apoyo.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por tenderme su mano y demostrarme cuán grande es su amor. Por permitirme llegar a este punto y alcanzar esta meta.

A la junta directiva de la Asociación Administradora del Acueducto Rural de Santa Cruz de Turrialba, al personal administrativo, así como a los fontaneros, por la colaboración brindada durante las visitas de campo.

Al personal del Centro de Investigación y de Servicios Químicos y Microbiológicos del Tecnológico de Costa Rica, por brindarme su colaboración en todo momento.

Al personal de la Escuela de Química y de la Carrera de Ingeniería Ambiental, a mis compañeros de cursos a lo largo de estos años por haber contribuido de una u otra manera.

Al profesor Ricardo Starbird Pérez, por la colaboración brindada para la compra de la resina para las pruebas experimentales. Muchas gracias por apoyo.

Al Profesor Federico Masis Meléndez, por el apoyo brindado para la realización de las pruebas en laboratorio, por su tiempo y dedicación.

A mi profesor tutor Macario Pino Gómez, quien me brindó su confianza para llevar a cabo este proyecto, gracias por el apoyo, el tiempo y el conocimiento que me dio durante la realización de este proyecto.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	1
ABSTRACT	2
1. INTRODUCCIÓN	3
2. OBJETIVOS	4
2.1.1 Objetivo general	4
2.1.2 Objetivos específicos.....	4
3. REVISIÓN DE LITERATURA	5
3.1 CALIDAD DEL AGUA.....	5
3.1.1 Afectación de la calidad del agua	6
3.2 GENERALIDADES DE LOS TRATAMIENTOS PARA LA POTABILIZACIÓN DEL AGUA	11
3.2.1 Tecnologías para el ablandamiento de agua para consumo humano	13
3.2.2 Tecnologías para remover sulfatos de agua para consumo humano	18
3.3 SISTEMA DE TRATAMIENTO PARA POTABILIZACIÓN DE AGUA	21
3.3.1 Generalidades.....	21
3.3.2 Implementación de unidades de intercambio iónico	23
4. MATERIALES Y MÉTODOS	24
4.1 LUGAR DE ESTUDIO.....	24
4.2 CARACTERIZACIÓN DEL RECURSO HÍDRICO.....	26
4.2.1 Oferta del recurso hídrico disponible	26
4.2.2 Análisis de calidad del agua captada.....	27
4.2.3 Análisis de la demanda actual de agua potable.....	28
4.2.4 Análisis de la demanda futura de agua potable	29
4.3 SELECCIÓN DE TECNOLOGÍA DE TRATAMIENTO	31
4.3.1 Caracterización del agua para fase experimental.....	31
4.3.2 Ablandamiento del agua por precipitación	32
4.3.3 Montaje de unidad de intercambio iónico para remoción de sulfato	36
4.4 DISEÑO DE SISTEMAS PARA LA POTABILIZACIÓN DE AGUA	41
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	41
5.1 OFERTA DEL RECURSO HÍDRICO DISPONIBLE	41

5.2	<i>ANÁLISIS DE LA CALIDAD DEL AGUA CAPTADA</i>	50
5.3	<i>ANÁLISIS DE LA DEMANDA ACTUAL DE AGUA POTABLE</i>	54
5.3.1	Proyección de la demanda futura.....	57
5.3.2	Cálculo del consumo futuro de agua.....	58
5.4	<i>SELECCIÓN DE TECNOLOGÍA DE TRATAMIENTO</i>	61
5.4.1	Ablandamiento del agua por precipitación.....	62
5.4.2	Unidad de intercambio aniónico para la remoción de sulfato en agua.....	63
5.5	<i>sistema para la potabilización de agua</i>	69
5.5.1	Sistema de tratamiento actual.....	69
5.5.2	Propuesta de sistema de tratamiento.....	72
6.	CONCLUSIONES	76
7.	RECOMENDACIONES	77
8.	REFERENCIAS	79
9.	APÉNDICES	82
	APÉNDICE 1. REGISTRO FOTOGRÁFICO DE LAS CAPTACIONES Y SU SITIO DE AFORO.	82
	APÉNDICE 2. REGISTRO DE AFOROS	84
	APÉNDICE 3. REGISTRO DE AFOROS REALIZADOS POR EL PROYECTISTA	85
	APÉNDICE 4. REGISTRO DE ANÁLISIS DE LABORATORIO	88
	APÉNDICE 5. DATOS DE MICROMEDICIÓN APORTADOS POR LA ADMINISTRACIÓN DEL ACUEDUCTO RURAL DE SANTA CRUZ DE TURRIALBA	91
	APÉNDICE 6. PROYECCIÓN DE LA POBLACIÓN PARA LA COMUNIDAD DE SANTA CRUZ DE TURRIALBA	93
	APÉNDICE 7. COMPARACIÓN DE RESINAS DISPONIBLES COMERCIALMENTE	94

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1. Esquema de tratamiento para ablandamiento de agua mediante cal.	17
Figura 3.2 Esquema de una columna de intercambio iónico y su ciclo de servicio. Adaptado de (AWWA, 2011)	19
Figura 4.1. Ubicación de las nacientes del Acueducto Rural de Santa Cruz.	25
Figura 4.2. Esquema del sistema de columna de intercambio iónico a escala de laboratorio	40
Figura 5.1. Histograma de los caudales reportados durante los aforos comprendidos entre los años 2015 y 2018.	45
Figura 5.2. Comportamiento de las precipitaciones registradas por la estación meteorológica de Capellades de Alvarado, periodo comprendido del 2013 al 2017.....	48
Figura 5.3. Comparación de caudales y precipitación para los años 2016 y 2017	49
Figura 5.4. Comportamiento de la concentración de Sulfato.	53
Figura 5.5. Comportamiento de la concentración de Dureza Total.	53
Figura 5.6. Consumo de agua potable mensual de acuerdo con el registro de la cantidad de abonados con micro medición instalada del mes de setiembre de 2017 al mes de abril de 2018.....	55
Figura 5.7. Comportamiento de la población futura del distrito Santa Cruz de Turrialba ...	58
Figura 5.8. Curva de ruptura de la resina Amberlite® IRA 910 para la retención del ion sulfato.	65
Figura 5.9. Eficiencia de remoción del ion sulfato por parte de la resina Amberlite® IRA 910	65
Figura 5.10. Comparación de puntos experimentales y curvas de ruptura calculadas por (a) modelo de Thomas (b) modelo de Bohart Adams (c) modelo de Yoon- Nelson y (d) modelo de Wolborska.....	68
Figura 5.11. Sistema de cloración en tanque de reunión de aguas	71
Figura 5.12. Esquema de tratamiento de aguas propuesto para el abastecimiento de agua por parte del Acueducto Rural de Santa Cruz de Turrialba.....	72

LISTA DE CUADROS

Cuadro 3.1. Cobertura de agua potable en Costa Rica para el año 2014	6
Cuadro 3.2. Tecnologías para el tratamiento de agua para su potabilización.	12
Cuadro 3.3. Clasificación de la dureza en agua para consumo humano	14
Cuadro 3.4. Modelos de ajuste de curvas de ruptura	20
Cuadro 4.1. Descripción de la zona de aforo para cada naciente que abastece al Acueducto Rural de Santa Cruz de Turrialba.	26
Cuadro 4.2. Métodos utilizados por el CEQIATEC para la medición de los parámetros de calidad de agua de las muestras tomadas en las captaciones del acueducto.....	28
Cuadro 4.3. Resultados de la caracterización del recurso hídrico de las nacientes Caragra y La Quebrada.....	32
Cuadro 4.4. Resultados de las mediciones de masa de cal comercial.....	33
Cuadro 4.5. Cálculo de la concentración inicial de hipoclorito de calcio para preparar la curva de demanda de cloro.....	34
Cuadro 4.6. Tratamientos realizados	35
Cuadro 4.7. Datos de pH y temperatura para los tratamientos posterior a agitación rápida	35
Cuadro 4.8. Características de la resina seleccionada.....	37
Cuadro 4.9. Valores para la estimación del volumen de agua a tratar.....	38
Cuadro 5.1. Registro de aforos de las nacientes captadas por el acueducto rural de Santa Cruz de Turrialba de los años 2015 y 2016.....	43
Cuadro 5.2. Registro de aforos de las nacientes captadas por el acueducto rural de Santa Cruz de Turrialba de los años 2017 y 2018.....	44
Cuadro 5.3. Descripción de riesgos y oportunidades de mejora para los aforos en captaciones que emplea la ASADA Santa Cruz de Turrialba.	46
Cuadro 5.4. Resumen de caudal promedio ofertado por las nacientes captadas por el acueducto rural de Santa Cruz de Turrialba.	50
Cuadro 5.5. Registro histórico de los análisis de laboratorio realizados por el acueducto rural de Santa Cruz de Turrialba.	51
Cuadro 5.6. Concentración promedio de los contaminantes por naciente	51

Cuadro 5.7. Coeficientes de correlación entre el sulfato y parámetros de calidad del agua con valores por encima de la norma nacional.	52
Cuadro 5.8. Datos de consumo promedio y per cápita para los sistemas de micro medición instalados por la ASADA Santa Cruz de Turrialba.	56
Cuadro 5.9. Índices de crecimiento poblacional para el distrito de Santa Cruz de Turrialba	57
Cuadro 5.10. Datos de población futura para el distrito de Santa Cruz de Turrialba.	57
Cuadro 5.11. Resultados de la estimación de la dotación bruta.	59
Cuadro 5.12. Estimación del Qmd, QMD y QMH para los años 2040 y 2045	59
Cuadro 5.13. Capacidad de las tecnologías para la reducción de contaminantes en agua para consumo humano.	61
Cuadro 5.14. Resultados de la evaluación de cal comercial para la remoción de dureza total y sulfatos del agua que abastece el Acueducto Rural de Santa Cruz de Turrialba.	62
Cuadro 5.15. Resultados de aplicación de 4 modelos experimentales para la prueba de intercambio iónico de la resina Amberlite® IRA 910	67
Cuadro 5.16. Cálculo de los volúmenes de almacenamiento	75

LISTA DE SIGLAS Y ACRÓNIMOS

ARESEP	Autoridad Reguladora de los Servicios Públicos
ASADAs	Asociaciones Administradoras de Acueductos y Alcantarillados
ASCE	Sociedad Americana de Ingenieros Civiles
AWWA	Asociación Americana de Obras Hidráulicas
BTC	Curva de ruptura
BV	Volumen de lecho
CAARs	Comités Administradores de Acueductos Rurales
CCH	Dureza del Carbonato de Calcio
CEQIATEC	
CNH	Dureza del Calcio sin Carbonato
EBCT	Tiempo de contacto del filtro vacío
ESPH	Empresa de Servicios Públicos de Heredia
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
ICAA	Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados
IFAM	Instituto de Fomento y Asesoría Municipal
INEC	Instituto Nacional de Estadísticas y Censos
MCH	Dureza del Carbonato de Magnesio
MNH	Dureza del Magnesio sin Carbonato
N.R	Dato no registrado
OMS	Organización Mundial de la Salud
Qmd	Caudal medio diario
QMD	Caudal máximo diario
QMH	Caudal máximo horario
SFR	Tasa de Flujo de Servicio

RESUMEN

La Asociación Administradora del Acueducto Rural de Santa Cruz de Turrialba, a lo largo de los últimos años, ha registrado problemas con la calidad del recurso hídrico. Esto ha comprometido el servicio que se brinda a la población, debido al incumplimiento con los parámetros establecidos por la legislación vigente. Tal situación, generó la necesidad de llevar a cabo un estudio para evaluar la cantidad y la calidad del agua disponible para atender las necesidades presentes y futuras de la población. Además, basándose en el comportamiento de la calidad del agua, fue necesario plantear una revisión de tecnologías disponibles para el tratamiento de agua comprometida con valores elevados de dureza ocasionada por calcio, magnesio y sulfato. Se encontró para el tratamiento de la dureza el ablandamiento por precipitación, la cual fue analizada y se obtuvo una capacidad para remover magnesio de hasta un 99,87% y desfavorable para el calcio pues se dio un incremento en su concentración en el efluente con respecto al valor inicial según los tratamientos llevados a cabo. En el caso de la cloración del agua, se observó como al ser añadido el hipoclorito de calcio al agua se disminuyeron los valores de calcio y magnesio en (12,35% y 61,90%), hecho que provocó que el agua estuviera acorde con lo estipulado por el reglamento para la calidad del agua potable de Costa Rica. Para el caso del sulfato, se realizó a nivel de laboratorio un ensayo piloto empleando una columna empacada con la resina Amberlite® IRA 910. Haciendo un análisis de correlación entre la curva de ruptura y los modelos aplicados se destacó el modelo de Thomas, pues se observó un coeficiente de correlación de 0,9892. A partir de este modelo se estimó una capacidad de remoción de 84,30 mg·g⁻¹. De esta manera, se evidencia la posibilidad de emplear el intercambio iónico como alternativa viable, para ello se deben realizar una mayor cantidad de pruebas a nivel de laboratorio o a nivel piloto en el campo.

Palabras clave: Agua potable, Dureza total, Ablandamiento del agua, Sulfato, Intercambio iónico.

ABSTRACT

The Administrative Association of the Rural Aqueduct of Santa Cruz, Turrialba, over the last few years, has registered problems with the quality of the water resource. This has compromised the service provided to the population, due to non-compliance with the parameters established by current legislation. Such situation, generated the need to carry out a study to evaluate the quantity and quality of water available to meet the present and future needs of the population. In addition, based on the behavior of water quality, it was necessary to propose a review of available technologies for the treatment of water compromised with high values of hardness caused by calcium and magnesium, as well as sulphate. It was found for the treatment of the hardness the softening by precipitation, and it was obtained a capacity to remove magnesium of up to 99.87% and unfavorable for calcium because there was an increase in its concentration in the effluent with respect to the initial value according to the treatments carried out. In the case of water chlorination, it was observed that when calcium hypochlorite was added to water, the calcium and magnesium values were reduced (12.35% and 61.90%), which caused the water to be in agreement with the stipulations of the regulation for the quality of drinking water in Costa Rica. In the case of sulphate, an assay was performed at the laboratory level using a column packed with the Amberlite® IRA 910 resin. There was a correlation of the data using a Thomas model, since it was observed a correlation coefficient of 0.9892. From this model, a removal capacity of $84.30 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ was estimated. In this way, evidenced the possibility of using ion exchange as a viable alternative, for this, a greater number of tests should be carried out at the laboratory or pilot level

Key words: Drinking water, Total hardness, Water softening, Sulfate, Ionic exchange.

1. INTRODUCCIÓN

El abastecimiento de agua en términos de calidad y cantidad en el mundo está afrontando problemas. Es indispensable disponer de este recurso para satisfacer todas las necesidades humanas, tanto para su consumo como para el aseo. Sin embargo, una tercera parte de las personas en el planeta no cuenta con acceso al agua potable (Schwarzenbach, Egli, Hofstetter, von Gunten, & Wehrli, 2010) tal situación, requiere la toma de acciones para asegurar la calidad del recurso hídrico que se abastece a la población.

Los requerimientos básicos para asegurar la calidad del agua para consumo humano, de acuerdo con la Organización Mundial de la Salud, OMS por sus siglas, se basan en hacer un manejo preventivo del recurso desde el momento en que es captada en la fuente hasta su uso por parte de los consumidores. En otras palabras, debe asegurarse la protección del agua desde su origen para así evitar que sea contaminada y que esto perjudique posteriormente el sistema de tratamiento o desinfección empleado previo a la distribución a los usuarios del servicio (OMS, 2011)

En el caso de Costa Rica, las asociaciones administradoras de sistemas de acueductos y alcantarillados comunales (ASADAs) y los Comités Administradores de Acueductos Rurales (CAARs) abastecen a una población aproximada de 1 406 495 con una potabilidad del 80%. Estas entidades, presentan deficiencias en cuanto a la capacidad para desarrollar y realizar acciones de intervención de manera concertada y planificada, que les permita prevenir, mitigar o reducir los riesgos existentes en su gestión, y de esta forma, conducir hacia un desarrollo sostenible (Melo & Salazar, 2009) Al no tomarse las acciones necesarias para la identificación de amenazas al sistema, la estimación de las vulnerabilidades y la elaboración de planes de atención a emergencias, se está en una situación que puede afectar el bienestar de la población, así como la continuidad en la prestación del servicio de abastecimiento de agua (Herrera J. , Recurso hídrico y saneamiento: avances y desafíos, 2016)

Actualmente, la ASADA de Santa Cruz, Noche Buena y San Juan de Turrialba, tienen ubicadas sus nacientes en las laderas bajas del Volcán Turrialba. Ellas han presentado problemas en la calidad del recurso hídrico que brinda a la población, debido a la presencia de contaminantes inorgánicos: calcio, magnesio y sulfato principalmente. Esta situación ha provocado que estas asociaciones presenten la necesidad de solucionar dicho problema, de manera tal, que el servicio brindado a los habitantes de estas comunidades cumpla la

normativa nacional vigente y se reduzcan las posibles afectaciones a la población. Para esto, la presente investigación se planteó la necesidad de encontrar una alternativa de tratamiento para el ablandamiento del agua así como para la eliminación del ion sulfato.

2. OBJETIVOS

2.1.1 Objetivo general

Desarrollar una propuesta de sistema de tratamiento para disminuir el contenido de Dureza Total y Sulfato en el agua del Acueducto Rural de la Asada Santa Cruz de Turrialba.

2.1.2 Objetivos específicos

Realizar caracterización del recurso hídrico que abastece el acueducto de la ASADA Santa Cruz de Turrialba.

Seleccionar un sistema de tratamiento para la reducción del contenido de dureza total y sulfato en el agua usada para consumo humano por esta ASADA.

Verificar a escala de laboratorio la capacidad del ablandamiento con cal y el intercambio iónico con resina para disminuir el contenido de dureza total y sulfato en el agua de este acueducto.

3. REVISIÓN DE LITERATURA

En el presente capítulo se muestra información básica acerca de la calidad del recurso hídrico, como se ve afectada la calidad del agua para consumo humano con la presencia de agentes causantes de dureza y el sulfato. Además, se introducen cuáles son los aspectos que se contemplan en la legislación vigente. Se aborda el tema de las tecnologías disponibles para el tratamiento de aguas contaminadas. En el caso del tratamiento de dureza mediante ablandamiento, se profundiza el tema de la precipitación de agentes causantes de la dureza. Con respecto al contenido de iones sulfato, se aborda el tema del intercambio iónico mediante el uso de resinas y la predicción del comportamiento de estos sistemas. Finalmente se establecen los criterios que deben ser considerados para adoptar estos sistemas en diseños de plantas de tratamiento de agua para consumo humano.

3.1 CALIDAD DEL AGUA

De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud, OMS (2006), el agua de consumo potable es aquella que no ocasiona ningún riesgo significativo para la salud cuando se consume a lo largo de toda la vida. Las personas deben disponer de un suministro satisfactorio, que sea suficiente, inocuo y accesible. Por tal motivo, debe darse el máximo esfuerzo para la lograr que la inocuidad del agua de consumo sea la mayor posible.

También, se considera como agua potable toda aquella que pueda ser ingerida, que abastece y satisface las necesidades de los seres humanos, esto porque su composición química no presenta contaminantes que generen algún problema, sean estos microorganismos, sustancias químicas, agentes infecciosos, entre otros. Estos contaminantes, pueden ser un peligro para las personas que la consumen, por eso, es necesario la potabilidad. Por tales situaciones, es fundamental el conocimiento de la calidad del agua cuando es destinada para el consumo humano (Pérez-López, 2016)

En Costa Rica, el Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (ICAA) de acuerdo con su ley constitutiva debe resolver todo lo relacionado con el suministro de agua potable, dirigir, fijar políticas, establecer y aplicar normas, realizar y promover el planeamiento, financiamiento y desarrollo para el correcto abastecimiento a la población.

También, es de su competencia rectora, la evaluación y control de la calidad del agua en los sistemas de abastecimiento. En cuanto a los operadores encargados del suministro del recurso hídrico, estos tienen como misión llevar agua de calidad a sus usuarios. Sin embargo, por diversos motivos esto no ocurre siempre. (ICAA, 2015)

De acuerdo con los datos presentados por el ICAA, y según el tipo de ente operador, ver cuadro 3.1., la cobertura de agua potable en el país para los CAARs y las ASADAs es de un 82,4%, siendo este valor el menor para los organismos prestadores del servicio. Esto representa un total de 241.129 habitantes cuya agua no se considera potable. (ICAA, 2015)

Cuadro 3.1. Cobertura de agua potable en Costa Rica para el año 2014

Ente operador	Cobertura de agua potable (%)	Población con agua potable
ICAA	99,0	2.210.567
Municipalidades	95,1	635.793
ESPH	99,1	227.930
CAARs - ASADAs	82,4	1.130.268
Total	93,4	4.204.558

Adaptado de ICAA (2015)

3.1.1 Afectación de la calidad del agua

La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, por sus siglas en inglés) (2012) menciona que las interacciones ser humano-ambiente ha tenido consecuencias particularmente negativas para este segundo. En el caso del uso del agua, ha estado incrementando globalmente e incluso dos veces más rápido que el crecimiento de la población mundial durante el último siglo, lo que ha venido generando un creciente número de zonas que están cercanas a límites en los cuales los servicios de agua no podrán ser entregados de manera sostenible.

El consumo irracional y desmedido de los recursos naturales y sus efectos es notable. Se señala que, el planeta no tiene la capacidad de mantener el nivel de vida de las sociedades, en cuanto a la calidad y disponibilidad de recursos para las generaciones presentes y futuras, en mantener el estado óptimo la salud de los seres vivos, y en el equilibrio natural. Esta problemática global, recae directamente sobre el aire, suelo y especialmente sobre el agua,

pues, es señalada como el componente más importante en el mundo debido a la dependencia que tienen todas las formas de vida por este recurso. Sin embargo, la relativa abundancia del agua en Costa Rica ha creado la impresión que es infinitamente renovable y esto ha ocasionado un consumo desmesurado (Moreira, Araya, & Charpentier, 2015)

Esta relativa disponibilidad del recurso hídrico del país se ve afectada por el mal manejo realizado, lo que amenaza su posibilidad de aprovechamiento en términos de calidad y cantidad. Algunos de los factores que comprometen la continuidad en el uso de este recurso son: la sobreexplotación, la contaminación de las aguas subterráneas y superficiales debido a las actividades del ser humano, la deforestación y afectación a las áreas de recarga, y los cambios en los patrones de precipitación (Herrera G. , 2011)

De acuerdo con Rajmohan & Amarasinghe (2016) la calidad de las aguas subterráneas es uno de los aspectos más importantes en su gestión al igual que su disponibilidad e idoneidad. Además, Sojobi (2016) señala que las principales fuentes de abastecimiento de agua para consumo humano en zonas rurales alrededor del mundo son las aguas subterráneas obtenidas a través de perforaciones, pozos de poca profundidad y también de las nacientes. Con respecto a la calidad, ambos autores indican que no solo se ve influenciada por actividades antrópicas, como las actividades agrícolas, desarrollos rurales y urbanos sin planificación, industrialización, cambios en el uso de suelos, el impropio manejo y disposición de aguas residuales, bombeos de agua, lixiviación de aguas provenientes de rellenos sanitarios mal diseñados y construidos, fosas sépticas, y sistemas de drenaje.

También, está condicionada por los materiales del acuífero y procesos hidro y geoquímicos, litología, interacciones entre el agua y la roca e intrusión salina. Además, las propiedades químicas del agua subterránea se ven afectadas por aspectos como las formaciones geológicas y las condiciones climáticas. Además, los acuíferos superficiales son vulnerables a la contaminación proveniente de las aguas superficiales y de la recarga de aguas de la superficie terrestre.

Entonces, la afectación de la calidad del agua ocurre debido a componentes químicos añadidos de forma natural y artificial al agua de consumo que tienen la capacidad de producir efectos adversos sobre la salud tras periodos de exposición, generalmente prolongados. Entre ellos, se destacan algunas sustancias como el fluoruro, arsénico, nitratos, nitritos, otros. Otro de los aspectos que pueden repercutir en la calidad del recurso hídrico son los sabores y

olores. La aceptabilidad del agua depende en gran medida que no existan componentes microbianos, físicos y químicos que provoquen un rechazo por parte de los consumidores. Es por este motivo que debe investigarse cualquier cambio en el aspecto, sabor y olor del agua (OMS, 2006)

Los contaminantes de tipo químico presentes en el agua se pueden agrupar considerando la fuente principal del contaminante, esto permite tomar acciones para evitar o reducir al máximo la contaminación. Cuando la contaminación del agua por aspectos químicos ocurre, el peligro que acarrea se puede controlar a partir de la selección del agua de origen, el control de su contaminación, su tratamiento o su mezcla con otras aguas, e inclusive se puede controlar la contaminación que ocurre cuando se produce o se distribuye el agua de consumo, para esto, se optimizan los procesos o se especifican las características de los productos utilizados (OMS, 2006)

Con respecto a los componentes químicos de tipo inorgánicos, que a su vez son de origen natural y están presentes en el agua, existen muchas sustancias que son producto de diversas formas de liberación, como los mencionados anteriormente. Entonces, resulta necesario determinar si las fuentes de agua pueden utilizarse sin tratamiento adicional o si sería necesario algún sistema para retirar las sustancias contaminantes. En otros casos, cuando se dispongan de varias fuentes de agua, se podría alcanzar un resultado aceptable mediante la dilución o mezcla de agua con concentraciones altas con agua que contenga menores concentraciones de un contaminante. En el caso de sustancias químicas como las sales de calcio y magnesio (dureza) y sulfato se presentan naturalmente en el agua y pueden afectar la aceptabilidad del agua de consumo (OMS, 2006)

3.1.1.1 Origen de la dureza y afectación en el agua

El término Dureza del agua hace relación a las concentraciones de compuestos inorgánicos, en este caso, cationes metálicos multivalentes que se encuentren presentes en el agua. A su vez, existen maneras para clasificar la dureza, la primera de ellas es la dureza debida a carbonatos, la cual es sensible al calor y precipita a altas temperaturas. En segunda instancia, se tiene la dureza no carbonatada, esta se distingue por no ser posible su remoción por calor, está asociada a sustancias como los sulfatos, cloruros y nitratos. Existen elementos

que son más comunes de relacionar con la dureza, el calcio y magnesio son dos de estas sustancias que son tomadas en cuenta para determinar este parámetro. La dureza del agua tiene asociado beneficios y consecuencias para la salud, no obstante, hoy en día son tema de discusión. Las sales incrustantes son las que generan que al agua se le considere como “dura” y rangos entre los 150 a 300 miligramos por litro ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) expresados como carbonato de calcio (CaCO_3) son considerados así. Por otra parte, valores de dureza de 80 a 100 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ como CaCO_3 son aceptables para considerar potable el agua. Para el caso de Costa Rica se considera como valor recomendable los 400 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ como CaCO_3 con un valor máximo permisible de 500 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ como CaCO_3 . (Pérez-López, 2016)

De acuerdo con la OMS (2006) valores por encima a los 200 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ pueden provocar la formación de incrustaciones, mientras que valores por debajo a los 100 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ tienen una baja capacidad de amortiguación y pueden ser más corrosivas para las tuberías. Según esta entidad, estudios epidemiológicos, ecológicos y analíticos han demostrado que existe una relación inversa estadísticamente significativa entre la dureza del agua de consumo y las enfermedades cardiovasculares. No obstante, el grado de la dureza del agua puede afectar su aceptabilidad por parte del consumidor en lo que se refiere al sabor y a la formación de incrustaciones.

3.1.1.2 Origen del sulfato y afectación en el agua

El Azufre es un elemento que, según su ciclo hidrogeológico se encuentra en la naturaleza en diferentes estados de oxidación, de los cuales solamente 3 son considerados estables en el medio natural, el sulfuro (S^{2-}), azufre elemental (S^0) y el sulfato (SO_4^{2-}). Siendo este último, la especie acuosa del azufre con mayor presencia en los sistemas geoquímicos aeróbicos. (Bowell, s.f). En cuanto a la especiación y abundancia de las especies del azufre en las aguas subterráneas, Tostevin, Craw, Van Hale, & Vaughan (2016) mencionan que tienen implicaciones importantes para las reacciones Redox y el balance del pH, la ecología y la calidad del agua para consumo humano.

Con respecto a la presencia de sulfato en aguas subterráneas, según lo menciona Paternoster, Parisi, Caracasi, Favara, & Mongelli (2010) pueden derivar de la oxidación de la pirita y otras formas inorgánicas reducidas del azufre durante la meteorización, la

mineralización del azufre orgánico contenido en el suelo, lixiviación de minerales de sulfato, el sulfato presente en las aguas de lluvia y aguas geotérmicas.

Además, Tostevin et. al (2016) incluye algunas fuentes como el agua de lluvia, estas pueden acarrear el azufre de aerosoles marinos, contaminantes atmosféricos e incluso de gases volcánicos y la meteorización geológica de minerales de sulfito y evaporita. Con relación a los minerales de sulfuros, estos pueden oxidarse fácilmente cuando se exponen al oxígeno a medida que el agua circula a través de acuíferos poco profundos. Esta situación, aumenta la lixiviación de minerales que contienen azufre y aumenta la carga disuelta de estas sustancias. Los minerales sulfurosos pueden incluir evaporitas, sulfuros sedimentarios o sulfuros magmáticos, dependiendo de la geología regional, clima, y actividades humanas.

Debido a tales situaciones, la degradación en la calidad de las aguas subterráneas es planteada como un tema inquietante y se ha convertido en una preocupación a nivel mundial suplir con la demanda de agua para consumo humano debido a que la necesidad cada vez es mayor. Específicamente con relación al sulfato, se conoce que las concentraciones naturales en agua dulce son usualmente menores a $300 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (Alfarrah, Berhane, Chikira, Van Camp, & Walraevens, 2016)

En cuanto a las afectaciones asociadas al sulfato, según la OMS (2011) la presencia de sulfato en las aguas destinadas para consumo humano puede causar un sabor que es perceptible. El deterioro del sabor varía con la naturaleza del catión asociado; se ha encontrado que los umbrales de sabor están comprendidos entre $250 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ para sulfato de sodio y $1000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ para sulfato de calcio. Generalmente se considera que el deterioro del sabor es mínimo a niveles por debajo de $250 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

Sin embargo, los datos existentes no han identificado un nivel de sulfato en agua para consumo que pueda causar efectos negativos en la salud humana. Los niveles altos tienen un efecto laxante en consumidores no acostumbrados, principalmente cuando se consume una cantidad de sales como el sulfato de sodio y sulfato de magnesio en concentraciones que superen los $1000\text{-}1200 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. Pero, no existe un incremento en diarreas, deshidratación o pérdida de masa corporal. Además, es recomendable que las autoridades de salud notifiquen las fuentes de agua potable que contienen concentraciones de sulfatos por encima de $500 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (OMS, 2011)

Como un aspecto a considerar de manera adicional, se ha encontrado que las concentraciones de sulfato que superen los $200 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ favorecen la corrosión de los metales. En el caso de Costa Rica se estableció como valor recomendable los $25 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ y como valor máximo permisible los $250 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, según el Reglamento para la Calidad del Agua Potable (decretos N° 38924-S y N°41499-S) (Bolaños-Alfaro, Cordero-Castro, & Segura-Araya, 2017)

3.2 GENERALIDADES DE LOS TRATAMIENTOS PARA LA POTABILIZACIÓN DEL AGUA

De acuerdo con la Asociación Americana de Obras Hidráulicas, AWWA y la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles, ASCE (2012) para lograr mejorar los sistemas de distribución de agua, se debe hacer una planificación que permita identificar las necesidades presentes y futuras y determinar la dirección que se debe tomar. Para esto, se deben identificar cuáles son los componentes existentes del sistema y el área de servicio que abarcan, también, se deben realizar las proyecciones a largo plazo del área a ser servida por el acueducto, tomando en cuenta los periodos de planificación para las diferentes instalaciones del sistema de agua, así como las demandas de agua presentes y futuras. Además, se tienen que considerar los requisitos regulatorios para la aprobación y operación final del sistema e incluir una evaluación de fuentes alternativas de suministro como estrategia para atender los impactos que puedan tener las regulaciones, los aspectos sociales y ambientales como es el caso del cambio climático de manera tal, que se pueda hacer un uso sostenible de los recursos hídricos (AWWA & ASCE, 2012)

En el mundo, según AWWA (2012) se han desarrollado diferentes tecnologías de tratamiento de aguas para consumo humano tal y como se muestra en el cuadro 3.2. De esta manera, al momento de diseñar sistemas para la potabilización del agua las posibilidades existentes para alcanzar el nivel de potabilidad adecuado son amplias.

Cuadro 3.2. Tecnologías para el tratamiento de agua para su potabilización.

Turbiedad/ remoción de partículas	
a. Coagulación b. Floculación c. Clarificación <ul style="list-style-type: none"> • Sedimentación simple • Sedimentación de placas • Unidades de contacto de sólidos • Flotación de aire disuelto d. Unidades de contacto de sólidos e. Flotación de aire disuelto	f. Filtración <ul style="list-style-type: none"> • Filtros de arena rápidos – convencionales • Filtros de arena rápidos – filtración directa • Filtros de arena lentos • Filtración de tierra de diatomeas • Microfiltración • Ultrafiltración • Nanofiltración • Osmosis inversa
Bacterias, virus, remoción de quistes o inactivación	
a. Remoción – filtración (por encima) b. Inactivación – desinfección <ul style="list-style-type: none"> • Cloro • Cloraminas 	c. Inactivación – desinfección <ul style="list-style-type: none"> • Dióxido de cloro • Ozono • Radiación ultravioleta
Control de corrosión e incrustación	
a. Post tratamiento <ul style="list-style-type: none"> • Ajuste del pH • Adición de inhibidor 	
Color	
a. Coagulación/filtración rápida en arena b. Coagulación/microfiltración c. Adsorción <ul style="list-style-type: none"> • Carbón activado granular (CAG) • Carbón activado en polvo (CAP) • Resinas sintéticas (intercambio iónico) 	d. Ultrafiltración o Nanofiltración e. Oxidación <ul style="list-style-type: none"> • Ozono • Cloro • Permanganato de potasio • Dióxido de cloro
Control de olor y sabor	
a. Oxidación <ul style="list-style-type: none"> • Ozono • Cloro • Dióxido de cloro 	b. Oxidación <ul style="list-style-type: none"> • Permanganato de potasio • Adsorción (CAG o CAP)
Remoción de compuestos orgánicos volátiles	
a. Extracción de aire b. Adsorción (CAG)	c. Combinación de los anteriores

Continuación del cuadro 3.2.

Control de subproductos de la desinfección	
a. Eliminación de precursores <ul style="list-style-type: none">• Coagulación mejorada o ablandamiento• Adsorción (CAG)• Carbón activado biológico (CAB) o CAG con pre-ozonización• Nanofiltración	b. Remoción de subproductos de la desinfección <ul style="list-style-type: none">• Adsorción (CAG)• Extracción de aire (parcial)
Remoción/secuestro de hierro y manganeso	
a. Filtración de precipitados formados por pre-oxidación	c. Adición de polifosfatos
b. Adsorción/oxidación <ul style="list-style-type: none">• Medios de arena y/o antracita• Medios de arena verde• Medios propietarios	
Remoción de dureza	
a. Ablandamiento con cal	c. Nanofiltración
b. Intercambio iónico	d. Osmosis inversa
Remoción de compuestos orgánicos e inorgánicos	
a. Intercambio iónico	d. Oxidación química
b. Tratamiento biológico	e. Osmosis inversa
c. Adsorción por CAG o CAP	

Adaptado de (AWWA, 2012)

3.2.1 Tecnologías para el ablandamiento de agua para consumo humano

Las causas que generan dureza en agua están asociadas principalmente a la presencia de iones de calcio y magnesio. También, se incluyen otros cationes metálicos como el hierro, sodio, manganeso y estroncio. Estos cationes están presentes en el agua acompañados de aniones como el bicarbonato (HCO_3^-), sulfato (SO_4^{2-}), cloruro (Cl^-), nitrato (NO_3^-) y silicato (SiO_4^{2-}). La dureza se puede clasificar de dos maneras diferentes, la primera es la dureza por carbonatos y es causada por carbonatos y bicarbonatos de calcio, magnesio y sodio. La segunda, es la dureza no carbonatada, causada por compuestos de cloruro y sulfato con cationes divalentes. La dureza total es la suma de ambas fuentes (AWWA, 2012)

La clasificación de la dureza en el suministro de agua a nivel internacional se muestra en el cuadro 3.3. A pesar que el agua dura no tiene efectos en la salud, usar agua de este tipo incrementaría la cantidad de jabón necesaria y produciría incrustaciones en accesorios de

baños, utensilios de cocina, también causa incrustaciones y corrosión en calentadores de agua, calderas y tuberías. Se considera agua dura moderada, es decir, públicamente aceptable la que está comprendida entre los 60 y 120 mg·L⁻¹ como CaCO₃ (AWWA, 2012)

Cuadro 3.3. Clasificación de la dureza en agua para consumo humano

Clasificación	mg·L ⁻¹ de CaCO ₃
Blanda	0–50
Moderadamente blanda	51–100
Ligeramente dura	101–150
Moderadamente dura	151–200
Dura	201–300
Muy dura	>300

Por otra parte, en Costa Rica, existe el reglamento para la calidad del agua potable (Decreto N°38924-S, 2015) y su reforma (Decreto N° 41499-S, 2019), en ellos, se establecen que se debe considerar una línea base de calidad. Esto corresponde al análisis de los parámetros físicos y químicos que se separan por niveles de control (Nivel primero; N1, Nivel segundo; N2 y Nivel tercero; N3) siendo esto de aplicación para todos los sistemas de abastecimiento del país. Para el caso de la dureza total, se considera como parámetro de un N2 en el que se han definido sus valores de alerta y máximos en 300 y 400 miligramos por cada litro de agua. Por lo tanto, según la clasificación del cuadro 3.3. las autoridades costarricenses permiten suministrar aguas muy duras a los usuarios de los distintos acueductos del país y es hasta alcanzar los 400 miligramos por litros que se plantea el escenario de tomar acciones correctivas inmediatas.

Cuando las aguas para consumo humano alcanzan valores que establecen los límites establecidos, es necesario hacer uso de las tecnologías disponibles, como se mencionó previamente en el cuadro 3.2, las alternativas para el tratamiento de la dureza del agua se pueden realizar por tratamientos como el ablandamiento con cal o el intercambio iónico, que consiste en utilizar resinas de intercambio en forma de sodio, también, pueden ser removidos los minerales del agua utilizando una combinación de resinas en forma de hidrógeno o hidróxido. La nanofiltración por membranas puede remover cationes divalentes y la osmosis inversa, que además de la dureza, puede remover otros iones presentes. En el cuadro 3.4 se muestra una comparación entre estas alternativas de tratamiento, se resalta cuales factores y

aspectos deben ser tomados en consideración para decantarse por una u otra tecnología. (AWWA, 2011)

Cuadro 3.4. Comparación entre alternativas de tratamiento para reducir la dureza en agua para consumo humano.

Factor	Aspectos por considerar
Dureza del agua cruda	Para ablandamiento por precipitación e intercambio iónico, los costos de químicos y de disposición de residuos incrementa directamente proporcional con la cantidad de dureza removida. En el ablandamiento por membrana, valores altos de dureza al inicio requieren dosis altas de ácido o antiincrustantes para prevenir la precipitación de sales de calcio y magnesio y una alta presión sería requerida. Pero, es probable que la recuperación se rija por otros factores, como lo es el costo de la eliminación de residuos.
Dureza sin carbonatos	El costo de ablandamiento por precipitación incrementa cuando se debe remover dureza sin carbonato, esto se debe a que el carbonato de sodio es más costoso que la cal. Para el intercambio iónico o el ablandamiento por membrana, la diferencia entre dureza con o sin carbonatos no tiene diferencia al momento de ser removida.
Turbidez del agua cruda	El ablandamiento por precipitación es compatible con niveles relativamente altos de turbidez, aunque la pre-sedimentación es típicamente empleada para pretratar aguas superficiales con altos valores de turbidez. Para el caso de intercambio iónico o filtración por membrana requieren pretratamiento para remover partículas a menos que la fuente de agua tenga valores bajos de turbidez, como es el caso de muchas fuentes de agua subterránea, que aún puede requerir un tratamiento previo con filtración a presión para eliminar los productos de la corrosión o los materiales del acuífero que pasan a través de las pantallas del pozo.
Color y materia orgánica del agua cruda	Se remueve parcialmente la materia orgánica, especialmente la fracción que contribuye al color, pero, altas concentraciones de materia orgánica pueden interferir con la cristalización de $\text{CaCO}_3(s)$. Ablandamiento con resinas de intercambio catiónico no son afectadas adversamente por el color de la materia orgánica, pero no la remueve. La materia orgánica tiende a ensuciar las resinas de intercambio aniónico, así como la nanofiltración y la ósmosis inversa, entonces, el pretratamiento para remover materia orgánica es necesario cuando se usan estos materiales.
Concentración de los sólidos totales disueltos	Altos valores de sólidos totales disueltos hacen que el calcio y el magnesio sean ligeramente más solubles (menos removibles) en ablandamiento por precipitación y pueden tener un impacto adverso en ablandamiento por intercambio iónico, desde que la selectividad de resinas para iones de calcio y magnesio decrecen tanto como los sólidos totales disueltos incrementan. A valores altos de sólidos totales disueltos una resina de intercambio catiónico puede preferir el sodio por encima del calcio y magnesio, fenómeno conocido como inversión de selectividad. Si el deseo es remover los sólidos totales disueltos, el ablandamiento con cal presenta resultados modestos. Mientras que el ablandamiento por intercambio iónico incrementa los TDS, esto porque dos iones de sodio pesan más que el calcio o el magnesio por los cuales son intercambiados. Desmineralización de intercambio iónico, ósmosis inversa pueden reducir los TDS a cualquier valor deseado.

Continuación del cuadro 3.4

Factor	Aspectos por considerar
Hierro y manganeso	Ablandamiento con cal remueve eficientemente hierro y manganeso, pero el hierro y manganeso pueden ensuciar resinas de intercambio catiónico y nanofiltración y la ósmosis inversa a menos que el pretratamiento sea provisto para removerlo.
Objetivos del tratamiento	Ablandamiento por precipitación, intercambio iónico y membrana pueden agruparse como tratamientos típicos para suministros de agua municipales. Pero solo el ablandamiento por intercambio iónico y membrana pueden remover la dureza por completo. La remoción completa de la dureza es deseable en algunas aplicaciones industriales. El ablandamiento con cal y ablandamiento por membrana no incrementan la concentración de sodio, pero usando carbonato de sodio o soda caustica en ablandamiento por precipitación incrementarían la concentración de sodio, como lo haría el ablandamiento por intercambio iónico cuando se usa cloruro de sodio como regenerante. El ablandamiento puede influir en la corrosividad o el potencial de incrustaciones del agua tratada, pero independiente de cual proceso sea utilizado para ablandamiento, el agua al final debe estar propiamente estabilizada.
Otros constituyentes que requieren tratamiento	Todos estos procesos son generalmente eficientes en la remoción de cationes divalentes, sin embargo, difieren mucho en la habilidad para remover otros contaminantes como sílice, fluoruros, sulfatos, arsénico, cromo, precursores de subproductos de desinfección y otros compuestos orgánicos e inorgánicos.
Velocidad de flujo y sus variaciones	Para pequeños sistemas (hogares, suministros de agua a entes no comunitarios (escuelas, fábricas, edificios de oficinas, hospitales), pequeñas industrias, entre otros), el ablandamiento por intercambio iónico es el método usual de elección, pero la nanofiltración y la ósmosis inversa son sistemas que usualmente son usados cuando otros contaminantes también deben ser removidos. Para utilidades de mediana a gran escala el ablandamiento con cal era rutinariamente seleccionado en el pasado, pero hoy en día, es común para estos intereses considerar la nanofiltración e inclusive la ósmosis inversa en casos de valores altos de TDS. Al construir nuevas instalaciones o rehabilitar las existentes. Sistemas de intercambio iónico tienen poca dificultad para manejar flujos variables, hasta su flujo de diseño, pero ablandamiento por precipitación y por membrana pueden ser afectados adversamente o ser difíciles de controlar cuando el flujo de agua es altamente variable, entonces, el almacenamiento temporal puede ser requerido si la demanda es altamente variable.
Control del proceso y requerimientos operacionales	Para pequeños sistemas, especialmente aquellos que se basan en aguas subterráneas, el intercambio iónico y ablandamiento por membrana son más fácilmente automatizables y requieren menos atención para la operación que el ablandamiento por precipitación. Para suministros de agua superficiales que requieren pretratamiento, las 3 opciones son ampliamente comparables con respecto al proceso de control. Los requerimientos de entrenamiento del operador no varían considerablemente de un proceso a otro, pero se requieren diferentes habilidades. Una entidad puede estar inclinada a seleccionar un proceso en el que sus operadores o los operadores en el área ya estén familiarizados con él.
Opciones para disposición de residuos	Ablandamiento con cal produce residuos sólidos, mientras que el intercambio iónico o ablandamiento por membrana producen salmueras. El costo para disponer estos residuos está influenciado por el tipo y cantidad de residuo producido, distancias de transporte para sitios

potenciales de disposición deben considerarse. Algunas opciones de disposición pueden no ser ambiental o socialmente aceptables. Esfuerzos para controlar la salinidad y fomentar la reutilización de agua, especialmente en área de poca agua, recientemente han llevado a límites en las descargas de salmuera y en algunos casos a la prohibición de suavizadores de intercambiadores de iones domésticos.

3.2.1.1 *Ablandamiento de agua para consumo mediante formación de precipitado*

El ablandamiento por precipitación remueve partículas y materia orgánica, resulta adecuado como proceso de pretratamiento para la desmineralización por intercambio iónico y por procesos de membrana, a su vez, es raramente utilizado posterior a tales procesos, con excepción en ciertas aplicaciones industriales. Esta tecnología permite remover la dureza del agua mediante la aplicación con cal, $(Ca(OH)_2)$ y carbonato de sodio (Na_2CO_3) . (AWWA, 2012)

Para aguas subterráneas en la figura 3.1. se muestra el esquema típico que deben tener estos sistemas. El proceso de aireación reduce las concentraciones de dióxido de carbono, lo que reduce la dosificación de la cal y la producción de sólidos químicos residuales. Después, el ablandamiento con cal se realiza normalmente en una etapa y posterior a este, se incluye una etapa de recarbonización con tiempos de retención de al menos 20 minutos para asegurar una estabilización adecuada del pH antes de la filtración. También, previo al proceso de filtración es común que se deba agregar un antiescalante, por ejemplo, el hexametáfosfato de sodio, esto para minimizar la incrustación de los medios filtrantes por carbonato de calcio. (AWWA, 2012)

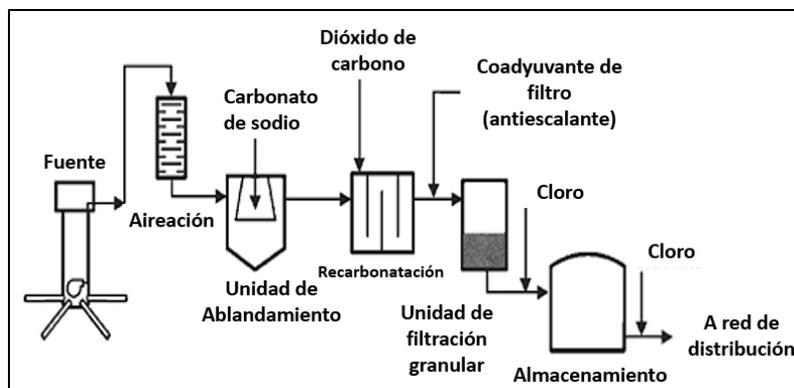


Figura 3.1. Esquema de tratamiento para ablandamiento de agua mediante cal.
Adaptado de (AWWA, 2012)

Para el ablandamiento por precipitación se deben determinar los tipos de dureza presentes en el agua, esto porque si se conocen estas categorías podrían determinarse los tipos de ablandadores recomendados según el caso. De esta manera, se tiene la dureza del carbonato de calcio (CCH, siglas en inglés), dureza del carbonato de magnesio (MCH, siglas en inglés), dureza del calcio sin carbonato (CNH, siglas en inglés) y la dureza del magnesio sin carbonato (MNH, siglas en inglés) (AWWA, 2011)

También, se tienen que establecer las ecuaciones de los diferentes compuestos químicos que gobiernan el tema del ablandamiento del agua. Y a su vez, determinar la capacidad de ablandamiento por precipitación mediante estimaciones como los cocientes de reacción, relación de saturación, índice de saturación, la energía libre de reacción, el índice de saturación de Langelier (que aplica a los casos específicos de precipitación de $\text{CaCO}_{3(s)}$ que permiten deducir si existe el potencial para remover el contaminante mediante precipitación (AWWA, 2011)

3.2.2 Tecnologías para remover sulfatos de agua para consumo humano

Tal y como se observó en el cuadro 3.2. el tema del tratamiento de compuestos inorgánicos se agrupa por tecnologías como el intercambio iónico, tratamientos biológicos, procesos de adsorción, así como por oxidación química y ósmosis inversa. Por su parte, Reinsel (2015) resalta cuales son las tecnologías existentes que permiten remover el sulfato del agua. Esto mediante procesos químicos, biológicos y físicos como se muestra en el cuadro 3.5.

Cuadro 3.5. Tipos de Tratamientos

Tipo de Tratamiento	Método
Químico	Precipitación de la Cal
	Precipitación de Bario
Biológico	Reactores de lecho fluidizado
	Tratamientos Pasivo
	Tratamientos <i>In Situ</i>
Físico	Procesos de intercambio de iones
	Nanofiltración
	Ósmosis Inversa

El intercambio iónico como tecnología, tiene la ventaja que puede operarse según la demanda del recurso hídrico para un determinado momento. Además, ante cambios en el flujo la afectación es relativamente baja si se compara con otras tecnologías, esto porque los tiempos de contacto requeridos son generalmente cortos y porque la concentración del contaminante en el efluente esencialmente puede alcanzar valores de cero. También, existen en el mercado gran cantidad de resinas para hacer frente a un contaminante de interés en específico. Y por último, el proceso de regeneración de la resina es selectivo y en algunos casos el regenerante puede ser reusado sin tener que remover el contaminante. (AWWA, 2011)

3.2.2.1 Reducción de la concentración de sulfato por intercambio iónico

Mediante el método que emplea resinas de intercambio aniónico usadas como adsorbentes para la purificación de agua para consumo humano (ver figura 3.2) es posible la eliminación de algunos compuestos inorgánicos presentes, entre ellos los sulfatos, nitratos y fluoruros. Es importante señalar que la eficiencia de remoción es dependiente de la competencia aniónica para las zonas de intercambio. Investigaciones realizadas utilizando estos materiales han mostrado capacidad de remoción de iones en concentraciones elevadas que generan incumplimientos con las normativas existentes, logrando en algunos casos, eficiencias de remoción con valores en rangos del 66,5 al 92% (Wang, Li, Wang, & Shuang, 2012).

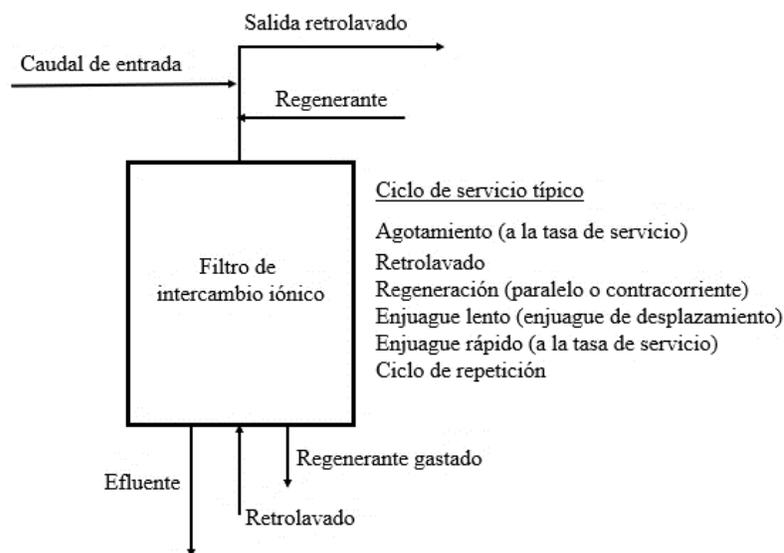


Figura 3.2 Esquema de una columna de intercambio iónico y su ciclo de servicio. Adaptado de (AWWA, 2011)

3.2.2.2 Modelación de curvas de ruptura

Las curvas de ruptura (BTC, por sus siglas en inglés) muestran el comportamiento de carga de iones de una solución en un material que se encuentre fijo, usualmente es expresado en términos de la concentración de la sustancia adsorbida o concentración normalizada definida como la relación de la concentración de la sustancia de interés en el efluente con respecto a la concentración en la entrada ($C \cdot C_0^{-1}$) como función del tiempo o el volumen del efluente para una altura del filtro dada. (García, Solache, Alarcón, & Martínez, 2014)

Hoy en día, las investigaciones intentan describir las curvas de ruptura experimentales haciendo uso de modelos matemáticos. La mayoría de estos modelos requieren la determinación de isothermas y parámetros de transferencia de masa, esto requiere experimentación adicional y una curva de ajuste no lineal. La complejidad matemática y/o la necesidad de conocer muchos parámetros a partir de diferentes experimentos hacen que el uso de estos modelos sea bastante inconveniente para usos prácticos. Además, en algunos casos, las soluciones analíticas de los modelos basados en ecuaciones diferenciales para los diferentes mecanismos según la tasa propuesta no están disponibles. Por estas razones, se han desarrollado varios modelos matemáticos empíricos para predecir el comportamiento dinámico de la columna (Trgo, Vukojevic, & Peric, 2011) El presente estudio aplica los modelos de Thomas, BDST (Bohart-Adams), Yoon-Nelson y Wolborska descritos por Trgo, Vukojevic, & Peric (2011) que se detallan en el cuadro 3.6

Cuadro 3.6. Modelos de ajuste de curvas de ruptura

Modelo	Ecuación ¹	Descripción del modelo
Thomas	$\ln\left(\frac{C_0}{C}-1\right) = \frac{k_T \cdot q \cdot m}{Q} - \frac{k_T \cdot C_0}{Q} \cdot V$ (ec. 3.1)	Se utiliza para diseñar la máxima capacidad de adsorción de un adsorbente, se asume que predomina la resistencia a la difusión de la película, y no se considera la dispersión axial
BDST (Bohart-Adams)	$\ln\left(\frac{C}{C_0}\right) = k_{BA} \cdot C_0 \cdot t - k_{BA} \cdot q_{BA} \cdot \frac{H}{v}$ (ec. 3.2)	Propone que la tasa de adsorción es proporcional a la capacidad residual del adsorbente y a la concentración de las especies sorbidas, principalmente determinadas por la adsorción en los sitios de superficie adsorbente y es usado para la descripción de la parte inicial de la curva de ruptura. Este modelo propone una relación entre la profundidad y el tiempo de ruptura

Continuación del cuadro 3.6

Modelo	Ecuación¹	Descripción del modelo
Yoon- Nelson	$\ln\left(\frac{C}{C_0-C}\right) = k_{YN} \cdot (t - \tau)$ (ec 3.3)	Modelo relativamente simple, no requiere datos relativos a las características del compuesto adsorbido, del adsorbente o las propiedades físicas del lecho.
Wolborska	$\ln\left(\frac{C}{C_0}\right) = \frac{\beta_a \cdot C_0}{q} \cdot t - \frac{\beta_a \cdot H}{v}$ (ec 3.4)	Este modelo se basa en la ecuación general de transferencia de masa para el mecanismo de difusión para un rango de baja concentración de curvas de ruptura

¹ C = concentración (mmol·L⁻¹), C₀= concentración inicial (mmol·L⁻¹), k_t = Constante de Thomas [L·(mmol·h)⁻¹], q= capacidad de remoción (mmol·g⁻¹), m= masa de resina (g), Q= flujo (L·h⁻¹), V= volumen del efluente (L), k_{BA}= tasa constante [L·(mmol·h)⁻¹], t= tiempo de servicio (h), q_{BA}= capacidad de remoción (mmol·g⁻¹), H= altura del material de intercambio (m), v= velocidad lineal del flujo (m·h⁻¹), k_{YN}= tasa constante (h⁻¹), τ= tiempo (h) cuando C·C₀⁻¹ =0,5, β_a= coeficiente cinético de la transferencia de masa externa (h⁻¹) Adaptado de (Trgo, Vukojevic, & Peric, 2011)

3.3 SISTEMA DE TRATAMIENTO PARA POTABILIZACIÓN DE AGUA

3.3.1 Generalidades

En situaciones en las que la implementación de sistemas para la potabilización del agua sea requerida, la AWWA (2012) recomienda tomar en cuenta los siguientes aspectos más allá del fin principal, que es lograr adecuar un tratamiento y así obtener un producto con los requerimientos que demandan las normativas vigentes

1. Costo de construcción
2. Costos anuales de operación y mantenimiento
3. Área del sitio requerida
4. Complejidad de operación (capacidad requerida del personal operativo y monitoreo de laboratorio)
5. Riesgos operacionales (las causas más comunes, si las hay, de falla del tratamiento)
6. Flexibilidad de la disposición de la planta para cambios futuros
7. Opciones de eliminación de residuos
8. Consideraciones de sostenibilidad

Se deben atender los problemas técnicos, ambientales, institucionales, financieros, legales, administrativos, de adquisición de tierras, derechos de agua y de operación y

mantenimiento que permitan el desarrollo y la implementación de un plan estratégico de gestión del agua (AWWA & ASCE, 2012)

Específicamente en términos de diseño de una planta de tratamiento de agua, es importante considerar que deben delimitarse las pautas generales para acciones futuras concernientes con el tratamiento de agua. También, se tienen que llevar a cabo el desarrollo de posibles alternativas de tratamiento para una evaluación adicional, esto debido a que la decisión final sobre el método puede ser obvia porque los datos de antecedentes de experiencias previas pueden ser contundentes, pero no la regla, de ahí la necesidad (AWWA & ASCE, 2012)

El ente a cargo del sistema de distribución del recurso hídrico no deberá ser conducido a una rápida aceptación de un tipo de tratamiento que eventualmente podría resultar muy costoso. Cuando exista información que es susceptible de ser cuestionada, resulta conveniente retrasar cualquier decisión de una eventual puesta en marcha hasta que se tenga información de fondo más significativa. Por último, se deberá hacer una consideración especial en las potenciales limitaciones, por ejemplo, la ubicación del sitio y los impactos ambientales, así se podrá determinar qué alternativas se deberán eliminar y cuales dificultades se podrían encontrar en otras alternativas (AWWA & ASCE, 2012)

Se debe poner atención especial en las principales aspectos que influyen y controlan el desarrollo de opciones de tratamientos de agua como lo son los reglamentos de agua potable vigentes, las opciones y limitaciones en relación a la gestión de los residuos, las ventajas y desventajas que se relacionan con los procesos, en temas de espacio, compatibilidad, flexibilidad para abordar cambios futuros en la calidad del agua de las fuentes debido a factores como lo puede ser el cambio climático, costos de capital, operación y mantenimiento, factores que afectan el diseño sostenible y el funcionamiento de los procesos de tratamiento, incluidos los productos químicos, la necesidad del ente administrador así como sus usuarios. (AWWA & ASCE, 2012)

En Costa Rica, el ICAA establece que para el diseño de sistemas de potabilización de agua para abastecimiento humano se debe aplicar la norma técnica para diseño y construcción de sistemas de abastecimiento de agua potable, de saneamiento y pluvial. Esta norma, establece los requisitos técnicos generales aplicables a los sistemas de abastecimiento de agua potable, de recolección, tratamiento y disposición de aguas residuales de tipo ordinario. Es el marco técnico, normativo, conceptual y metodológico, orientador del diseño y de la construcción de

proyectos de iniciativa pública o privada (ICAA, 2017) Con respecto a los requisitos técnicos generales para sistemas de abastecimiento de agua potable, según la normativa del ICAA se enumeran los aspectos que se deben considerar:

- | | |
|--|--|
| 1. Población de diseño | 9. Capacidad del sistema |
| 2. Periodos de diseño | 10. Velocidad |
| 3. Dotaciones | 11. Presiones |
| 4. Factores de demanda máxima | 12. Dimensionamiento de tuberías |
| 5. Caudal de incendio y ubicación del hidrante | 13. Diámetro mínimo |
| 6. Caudal coincidente | 14. Prevista |
| 7. Carga hidráulica | 15. Requisitos de materiales y de construcción |
| 8. Caudal de producción | 16. Potabilización del agua |

El ICAA establece que aquellos sistemas de abastecimiento que cuenten con fuentes superficiales o subterráneas propias deben cumplir con la normativa nacional que aplica para la calidad del agua potable y también con relación a sus procesos de tratamiento, las cuales son emitidas por el Ministerio de Salud y por parte del ICAA según corresponda. Todo esto es independiente del proceso de tratamiento que sea empleado (ICAA, 2017) En el caso de tratarse de un acueducto existente con problemas en la calidad del recurso hídrico se plantea un escenario en el que se requiere la implementación de un sistema para la potabilización del agua. Por ende, atendiendo la norma del ICAA, en el contexto de la presente investigación se requiere hacer un análisis de la población que debe atender la planta, incluyendo la capacidad de almacenamiento para satisfacer las necesidades de los usuarios.

3.3.2 Implementación de unidades de intercambio iónico

La principal información experimental requerida para los cálculos es una curva de avance de una columna de prueba, ya sea de laboratorio o de escala piloto, que se ha operado al mismo caudal de líquido en términos de volúmenes de lecho por unidad de tiempo, como la columna de diseño. Dado que los tiempos de contacto son los mismos, se supone que el volumen de líquido tratado por unidad de masa de absorbente, para un avance determinado en la columna de prueba es el mismo que para la columna de diseño. Antes de que se pueda realizar una prueba de avance, es necesario seleccionar un caudal de líquido satisfactorio, en volúmenes

de lecho por unidad de tiempo. Esto se puede estimar a partir de cálculos utilizando el volumen de avance requerido, la concentración de soluto, la concentración máxima de fase sólida y otros datos pertinentes. (Crittenden, Trussel, & Crittenden, 2012)

De acuerdo con la (AWWA, 2011) para el diseño de tratamientos mediante resinas debe tomarse en consideración que la capacidad de intercambio iónico se mide en miliequivalentes por mililitro ($\text{meq}\cdot\text{mL}^{-1}$), de esta manera, la capacidad de volumen húmedo de $1 \text{ meq}\cdot\text{mL}^{-1}$ equivale a $6,023 \times 10^{20}$ sitios de intercambio por cada mililitro de resina húmeda, incluyendo espacios vacíos. También, para investigación científica, el peso seco meq/g es más preciso y el más usado, además, la capacidad operativa es la medida del rendimiento actual de una resina, esta depende de la composición del agua de alimentación, la tasa de servicio y el grado de regeneración.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 LUGAR DE ESTUDIO

En presente estudio se localiza en el distrito de Santa Cruz, ubicado en el cantón de Turrialba, Provincia de Cartago, Costa Rica, se encuentra a una altura de 1475 msnm, con un área de $127,4 \text{ km}^2$ y una población de 3563 habitantes según datos del Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC). Comprende los poblados de: Bajos de Bonilla, Bolsón (parte) Bonilla, Buenos Aires, Calle Vargas, Carmen (parte), Esperanza, Guayabo Arriba, Pastora, Picada, Raicero, Reunión, San Antonio, San Diego, Torito (parte), Volcán. No obstante, el presente estudio no comprende la totalidad de los poblados descritos anteriormente, debido a que por motivos históricos y geográficos la prestación del servicio de acueducto abarca las comunidades del centro del distrito de Santa Cruz, El Carmen, Pastora (no abarca su totalidad), además de los pueblos de San Rafael y Verbena Norte, comunidades que políticamente pertenecen al distrito vecino de Santa Rosa.

En cuanto a los entes operadores del acueducto en la zona, cabe resaltar la presencia de un comité en las Virtudes de Santa Cruz, además de cuatro ASADAs: La Pastora, Calle Vargas, San Antonio y Santa Cruz. Siendo este último, el de interés para este estudio. En la figura 4.1. se puede observar el sector del distrito de Santa Cruz en el que se encuentran las

nacientes que el acueducto Rural de Santa Cruz de Turrialba capta el recurso hídrico que se distribuye a sus abonados.

Según datos aportados por la ASADA durante el mes de abril del 2018, se cuenta con un total de 906 abonados, un número de habitantes de 4000. Como se observa, este dato difiere al reportado por el INEC, debido a que, no cubre la totalidad del distrito de Santa Cruz y, por otro lado, se presta el servicio a la comunidad de San Rafael y Verbena Norte, pertenecientes al distrito de Santa Rosa. Dispone de 4 nacientes (“Caragra”, “El Cedro”, “La Quebrada” y “El Tirrá”) Cuenta con 4 tanques a nivel y 5 semienterrados, de estas 9 estructuras, 6 corresponden a estructuras de concreto y 3 son de plástico. Como sistema de cloración se utiliza la tecnología de pastillas de hipoclorito de calcio.

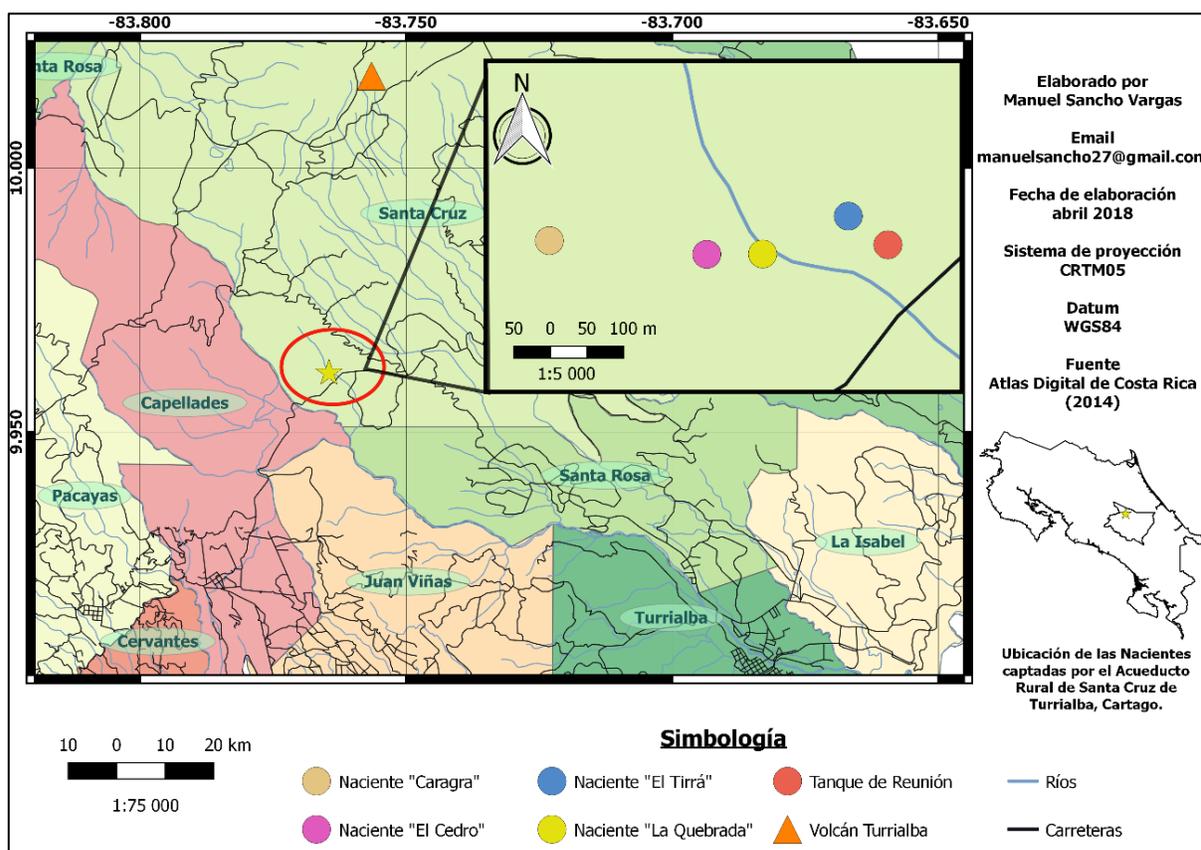


Figura 4.1. Ubicación de las nacientes del Acueducto Rural de Santa Cruz.

4.2 CARACTERIZACIÓN DEL RECURSO HÍDRICO

4.2.1 Oferta del recurso hídrico disponible

Para determinar el caudal que produce cada naciente de las que dispone la ASADA Santa Cruz para el abastecimiento de la población se utilizaron los registros de aforos que la ASADA realiza desde el año 2014. También, de manera quincenal, específicamente en los viernes para el periodo del 11 de agosto al 12 de diciembre de 2017 y durante las horas de la mañana mediante este proyecto, se realizó el aforo de las captaciones, esto en compañía de los fontaneros de la ASADA. Para ello se utilizó el método volumétrico, en el cual, se utilizó un recipiente con una capacidad o volumen de agua definido previamente en el Laboratorio de Aguas Potables de la Carrera de Ingeniería Ambiental del Instituto Tecnológico de Costa Rica y se cumplió con el protocolo de este tipo de aforo. En el cuadro 4.1. se describen las condiciones de infraestructura del sitio en el que se realizan los aforos, mientras que en el apéndice 1 se muestra el material fotográfico que muestra las condiciones descritas a continuación.

Cuadro 4.1. Descripción de la zona de aforo para cada naciente que abastece al Acueducto Rural de Santa Cruz de Turrialba.

Captación	Descripción del sitio donde se afora
Naciente Caragra	La estructura de captación cuenta con 2 salidas de tubería de PVC 4" al tanque de reunión y de 3" para aforar. Se procede a remover el tapón de rosca de la tubería para realizar el aforo, se cierra mediante una válvula de bola la tubería que conduce el agua al tanque de reunión y se da un lapso de 2 a 3 minutos para que se normalice el caudal, sin embargo, no se cuenta con las condiciones óptimas para realizar el aforo, debido a factores como pendiente, obstáculos, inestabilidad del suelo (se realiza sobre rocas que están en la quebrada)
Naciente El Cedro	La estructura de captación cuenta con 2 salidas de tubería de PVC 4". Una de estas se utiliza para conducir el agua al tanque de reunión, la otra, para realizar aforos. Se abre el paso de agua a la tubería de aforo, por otra parte, se impide el paso al tanque de reunión mediante válvula de bola. Se da un tiempo de 2 a 3 minutos para normalizar el caudal. Al igual que en la naciente Caragra, no se cuenta con las condiciones óptimas para realizar el aforo, debido a factores como pendiente, obstáculos, inestabilidad del suelo (se realiza sobre rocas que están en la quebrada)

Continuación de cuadro 4.1.

Captación	Descripción del sitio donde se afora
Naciente La Quebrada	La estructura de captación cuenta con una salida de tubería de PVC 4 “En una sección del trayecto entre la estructura y el tanque de reunión existe una válvula de bola y previo a esta, una Tee de PVC 4”. Se retira el tapón que posee la Tee y se procede al cierre de la válvula, después de un tiempo de 2 a 3 minutos para normalizar el caudal se realiza el aforo.
Naciente El Tirrá	La estructura de captación cuenta con 2 salidas de tubería de PVC 4”. Ambas cuentan con válvula de compuerta. Se habilita el paso de agua por la tubería que permite hacer el aforo y se procede a cerrar la línea que conduce al tanque de reunión. Por un lapso de 2 a 3 minutos se da la normalización del caudal y se procede a realizar el aforo. No se contó con las mejores condiciones para realizar el aforo, debido a que la válvula que conduce al tanque de reunión se encuentra dañada, esto impide un cierre efectivo del paso de agua al momento de tomar el aforo.

4.2.2 Análisis de calidad del agua captada

Con el propósito de evaluar la calidad del agua utilizada por el acueducto para abastecer a sus abonados, se emplearon los registros de análisis realizados por la ASADA, se registró la información disponible desde el año 2009. Adicional a estos registros, se realizó un total de 10 análisis fisicoquímicos y microbiológicos por parte de este proyecto. A partir de los parámetros de los niveles uno, dos y tres del Reglamento para la Calidad del Agua Potable de Costa Rica (decretos N° 38924-S y N°41499-S) durante un periodo de cuatro meses, se tomaron muestras de agua en las captaciones para realizar la determinación de pH, temperatura, turbiedad, color aparente, conductividad, color, olor, sabor, coliformes fecales, *Escherichia Coli*, calcio, magnesio, dureza total, sulfato y potasio. Los análisis se llevaron a cabo en el Centro de Investigación y de Servicios Químicos y Microbiológicos (CEQIATEC) del Instituto Tecnológico de Costa Rica. En el cuadro 4.2. se presentan los métodos estándar llevados a cabo por el laboratorio para los ensayos respectivos (APHA, AWWA & WEF, 2012)

Cuadro 4.2. Métodos estándar utilizados por el CEQIATEC para la medición de los parámetros de calidad de agua de las muestras tomadas en las captaciones del acueducto.

Parámetro	Método
Color aparente	2120-C
Turbiedad	2130-B
pH	4500 H+ - B
Conductividad	2510-B
Cloro residual libre	4500 Cl-G
Cloro residual combinado	4500 Cl-G
Sabor	2160
Olor	2150
Coliformes fecales	9221 E
<i>Escherichia coli</i>	9221 F
Calcio	3111-B
Magnesio	
Sulfato	4110-B
Dureza Total	2340-B
Potasio	3500 K-B

Además, en los muestreos, se determinó en campo el pH y la temperatura al momento en que se efectuaban los aforos. Se utilizó un pH metro marca *Hanna Instruments*, modelo *HI 98 128*. Todas las muestras fueron transportadas hasta el laboratorio en hielera plástica a cerca de 4°C.

4.2.3 Análisis de la demanda actual de agua potable

Para estimar la demanda actual de agua potable de la población que es abastecida por el acueducto se solicitó un reporte de los registros de consumo disponibles en el sistema utilizado por parte de la ASADA. Este sistema realiza la clasificación de los abonados en “DOMIPRE” para los usuarios de uso domiciliario o “EMPREGO” para el caso de los usuarios de tipo comercial, empresarial, industrial e institucional. De esta manera se cuenta con la información histórica o mensual de consumo por abonado, cantidad de abonados, total de abonados activos e inactivos, sectorización de las comunidades abastecidas, entre otros.

Debido a que la implementación de la micro medición a los abonados de la ASADA es un proyecto que se inició en el 2016, actualmente se han instalado alrededor de un 21% de

equipos para medir consumo de agua por abonado. Por tal motivo, únicamente se consideran los registros de consumo del mes de setiembre de 2017 a abril de 2018. Se estimó el consumo promedio mensual por tipo de abonado para el mes de abril de 2018 que es el mes con el que se cuenta con la mayor cantidad de usuarios con equipo de micro medición instalados. Con la información obtenida, se hizo una estimación del consumo por habitante, utilizando datos de ocupación de personas por vivienda según datos del INEC.

4.2.4 Análisis de la demanda futura de agua potable

Considerando la información demográfica registrada por el INEC para los censos de los años 1973, 1984, 2000 y 2011 se realizó la proyección de la población de la población que eventualmente será atendida por el Acueducto Rural de Santa Cruz de Turrialba. Lo primero, consistió en estimar la tasa de crecimiento poblacional aritmética, geométrica y logarítmica. De igual manera, el cálculo de la proyección de la población mediante el método aritmético, geométrico y logarítmico.

La dotación neta de acuerdo con (Lozano-Rivas & Lozano-Bravo, 2015) corresponde con la cantidad de agua potable que es requerida por un habitante para satisfacer sus necesidades básicas en un periodo de tiempo de un día, esto sin considerar las pérdidas que puedan ocurrir a lo largo de todo el sistema de tratamiento. Para el caso de esta investigación, este dato fue calculado atendiendo las recomendaciones de este autor que sugiere el uso de registros históricos proporcionados por sistemas de micro medición. Sin embargo, esta comunidad no cuenta con este sistema para la totalidad de sus abonados, por ende, los cálculos son basados únicamente con los registros disponibles. Tomando como punto de partida la descripción anterior, se procedió de la siguiente manera:

Dotación bruta: corresponde a la dotación neta incluyendo las pérdidas del recurso hídrico que puedan presentarse en el sistema de abastecimiento, el cálculo se realiza con la ecuación 4.1 (Lozano-Rivas & Lozano-Bravo, 2015)

$$D_{bruta} = \frac{D_{neta}}{(1-\%P)} \quad (\text{ec 4.1})$$

Donde,

- D_{bruta} Dotación bruta [$L \cdot (\text{hab} \cdot \text{día})^{-1}$]
- D_{neta} Dotación neta [$L \cdot (\text{hab} \cdot \text{día})^{-1}$]
- %P Pérdidas máximas admisibles, no deben superar el 25%

Caudal medio diario (Qmd): Es el consumo promedio diario que se estima para la población proyectada al final del periodo de diseño, se calcula con la expresión 4.2 (Lozano-Rivas & Lozano-Bravo, 2015)

$$Qmd = \frac{P \cdot D_{bruta}}{86400} \quad (\text{ec } 4.2)$$

Donde,

- Qmd Caudal medio diario ($L \cdot s^{-1}$)
- P Población proyectada al final del periodo de diseño
- D_{bruta} Dotación bruta [$L \cdot (\text{hab} \cdot \text{día})^{-1}$]

Caudal máximo diario (QMD): Es el consumo máximo registrado en 24 horas durante un año cualquiera, se calcula con la expresión 4.3 (Lozano-Rivas & Lozano-Bravo, 2015)

$$QMD = Qmd \cdot k_1 \quad (\text{ec. } 4.3)$$

Donde,

- QMD Caudal máximo diario ($L \cdot s^{-1}$)
- Qmd Caudal medio diario ($L \cdot s^{-1}$)
- k_1 Coeficiente de consumo máximo diario, se toma el valor de 1,2, según recomendación del ICAA (2017)

Caudal máximo horario (QMH): Es el consumo máximo registrado durante una hora en un año cualquiera, se calcula con la ecuación 4.4 (Lozano-Rivas & Lozano-Bravo, 2015)

$$QMH = QMD \cdot k_2 \quad (\text{ec. 4.4})$$

Donde,

QMH Caudal máximo horario ($L \cdot s^{-1}$)

QMD Caudal máximo diario ($L \cdot s^{-1}$)

k_2 Coeficiente de consumo máximo horario, se tomó un valor de 1,6. Según (Lozano-Rivas & Lozano-Bravo, 2015) toma valores en un rango de 1,2 y 1,8 según recomendación del ICAA (2017) el valor debe ser de 1,8.

4.3 SELECCIÓN DE TECNOLOGÍA DE TRATAMIENTO

A partir de la revisión de literatura y según los datos observados a partir de la caracterización del recurso hídrico. Se seleccionaron las tecnologías de tratamiento pertinentes para la reducción de calcio, magnesio y sulfato, especies iónicas presentes en altas concentraciones. Por ende, esta sección del capítulo describe como se desarrolló la fase experimental para evaluar a escala de laboratorio las tecnologías elegidas.

4.3.1 Caracterización del agua para fase experimental

La fase experimental de la presente investigación se realizó con una muestra de agua tomada el 27 de abril del 2018 y comprende la mezcla en proporciones de los caudales generados por las nacientes Caragra y La Quebrada. A esta agua se le realizó una caracterización de parámetros físicos y químicos de interés en el laboratorio CEQIATEC tal y como se muestra en el cuadro 4.3

Cuadro 4.3. Resultados de la caracterización del recurso hídrico de las nacientes Caragra y La Quebrada.

Parámetro		Unidades	Resultado
Nombre	Símbolo		
Potencial de hidrógeno	pH	-	6
Concentración iones hidrógeno	H ⁺	mol/L	0,000001
Temperatura	T	°C	25
Alcalinidad	CaCO ₃		168,25
Calcio	Ca ²⁺		81
Magnesio	Mg ²⁺		63
Dureza Total	CaCO ₃	mg/L	462
Sodio	Na ⁺		45,5
Potasio	K ⁺		14
Sulfato	SO ₄ ²⁻		344
Cloruro	Cl ⁻		53

4.3.2 Ablandamiento del agua por precipitación

4.3.2.1 Caracterización de la cal

Con el propósito de observar el comportamiento de esta tecnología a escala de laboratorio se inició con la cuantificación de la cantidad de hidróxido de calcio (Ca(OH)₂) disponible en una muestra elegida al azar de cal comercial, mediante el siguiente procedimiento:

- Se pesaron tres muestras de aproximadamente 0,2000 g de cal comercial en balanza analítica marca OHAUS, las muestras fueron disueltas en volúmenes de aproximadamente 50 mL de agua desionizada. Estas muestras fueron agitadas por 30 minutos a 30 rpm.
- Posteriormente fueron filtradas utilizando papel filtro marca Sartorius de 110 mm. La disolución que se obtuvo a partir de la filtración se dispuso en viales para examinar la concentración de calcio mediante adsorción atómica, procedimiento 3111-B.
- Se completó el trasvase de cualquier residuo que permaneciera en el recipiente utilizando agua desionizada, esto para obtener en el filtro la totalidad del material no disuelto que pudiera estar presente.

- Los filtros fueron colocados en estufa marca *THELCO*, modelo *130*, esto por dos horas y treinta minutos a una temperatura de 103°C.
- Transcurrido este tiempo, se retiraron de la estufa y se colocaron en un desecador por espacio de 30 minutos hasta alcanzar la temperatura ambiente, se midió la masa de las muestras, se colocaron nuevamente las muestras en el desecador y transcurridos otros 30 minutos (1 hora de haber sido retiradas de la estufa) se midió nuevamente la masa de los filtros con los residuos. Además de este secado, se incluyó uno adicional utilizando una estufa de secado de vacío por un tiempo de 60 horas aproximadamente. Posterior a este tiempo se colocaron las muestras en desecador y se midió la masa del papel filtro y el residuo, los resultados se muestran en el cuadro 4.4. en el que la masa del residuo se realizó considerando el valor de la masa del filtro medida a las 60 horas.

Cuadro 4.4. Resultados de las mediciones de masa de cal comercial.

Número de Muestra	Masa inicial cal (g)	Masa de filtro y filtro con residuos (g)			Masa de residuo en filtro (g)	Masa en disolución(g)	
		Filtro seco	0,5 horas	1 horas			60 horas
1	0.2001	0.2000	0.3307	0.3350	0.3341	0.1341	0.0660
2	0.2008	0.1990	0.3361	0.3363	0.3352	0.1362	0.0646
3	0.2020	0.2050	0.3479	0.3489	0.3475	0.1425	0.0595
Promedio	0.2010	0.2013	0.3382	0.3401	0.3389	0.1376	0.0634
desv. Est	0.0010	0.0032	0.0088	0.0077	0.0074	0.0044	0.0034

4.3.2.2 Prueba de demanda de cloro

El 02 de mayo del 2018 se realizó la prueba de demanda de cloro en el Laboratorio de Aire y Agua Potable de la Carrera de Ingeniería Ambiental del Tecnológico de Costa Rica, para determinar la dosis óptima de cloro que se aplica al agua que se abastece a la población. Se realizó un muestreo de la disolución de cloro aplicada por el acueducto, esto con la intención de conocer la concentración que actualmente se añade al sistema. La muestra fue recolectada por el investigador, fue almacenada en botella plástica y trasladada hasta las instalaciones de la universidad en hielera plástica con hielo, evitando el contacto de la

muestra con la luz solar para no favorecer reacciones secundarias del cloro. Al tratarse de una disolución concentrada, se preparó una disolución 1/50 y se aforó en un balón de 100 mL, se midió la concentración de cloro total de la disolución preparada con un equipo marca *Thermo Scientific*, modelo *ORION AQ3070* que permite medir el valor de cloro total y cloro residual libre. Como resultado se obtuvo un valor de $1,12 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ y, por ende, se determinó que el valor de la concentración de la disolución aplicada en el sistema de cloración de la ASADA fue de $56 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. Para la elaboración de la curva de demanda de cloro, en el cuadro 4.5. se observan los parámetros obtenidos

Cuadro 4.5. Cálculo de la concentración inicial de hipoclorito de calcio para preparar la curva de demanda de cloro.

Número de muestra	Solución de Hipoclorito de Calcio estándar		Muestras preparadas para curva de demanda de cloro	
	Volumen alícuota (mL)	Concentración ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	Volumen (mL)	Concentración ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
1	0,3	56,00	50,3	0,33
2	0,6	56,00	50,6	0,66
3	0,9	56,00	50,9	0,99
4	1,2	56,00	51,2	1,31
5	1,5	56,00	51,5	1,63
6	1,8	56,00	51,8	1,95
7	2,1	56,00	52,1	2,26
8	2,4	56,00	52,4	2,56
9	2,7	56,00	52,7	2,87
10	3,0	56,00	53,0	3,17
Testigo	3,0	56,00	53,0	3,17

Con esta información, se dio un tiempo de contacto de cloro de 30 minutos para cada muestra. Posterior a esto, se realizó la lectura del cloro residual total y el cloro residual libre.

4.3.2.3 Ensayo de ablandamiento por precipitación

A partir de esta información, se realizaron 4 tratamientos mediante prueba de jarras para determinar los remanentes de Dureza Total (Calcio y Magnesio), Ion Sulfato (SO_4^{2-}), tal y como se muestra en el cuadro 4.6.

Cuadro 4.6. Tratamientos realizados

Tratamiento	Descripción
1	Agua cruda + hipoclorito de calcio → Análisis DT y SO_4^{2-}
2	Agua cruda + cal comercial → Sedimentación → Análisis DT y SO_4^{2-}
3	Agua cruda + cal comercial → Sedimentación → Hipoclorito de calcio → Análisis DT y SO_4^{2-}
4	Fracción de agua de tratamiento 2 → Hipoclorito de calcio → Análisis DT y SO_4^{2-}

Se inicia con 3 tratamientos, a estos se les añadió aproximadamente 800 mL de agua cruda. Para el primer tratamiento fue añadida una dosis de hipoclorito de calcio hasta alcanzar aproximadamente una concentración de cloro de 1,0 ppm. Al segundo tratamiento se le añadió una dosis de 2.21 g de cal, al tercer tratamiento se añadió 2.24 g de cal. A los 3 tratamientos se les aplicó durante un minuto una agitación rápida a 100 rpm aproximadamente. Seguidamente, se midió el pH a cada uno de estos tratamientos. Los resultados se muestran en el cuadro 4.7.

Cuadro 4.7. Datos de pH y temperatura para los tratamientos posterior a agitación rápida

Tratamiento	pH	Temperatura (°C)
1	6,79	18,4
2	11,88	18,4
3	11,14	18,6

Se inició el periodo de agitación lenta, el cual se llevó a cabo por espacio de 25 minutos. Al finalizar este periodo, se procedió a dar un tiempo de sedimentación por 30 minutos. Al finalizar este periodo se tomó una fracción de cada uno de los sobrenadantes de los tratamientos. Este volumen se utilizó directamente en el caso del tratamiento 1 y 2 para realizar la medición de dureza total y sulfatos. El volumen de los sobrenadantes de los tratamientos 2 y 3 se utilizó a su vez para añadir la dosis de hipoclorito de calcio que permitiera una concentración de aproximadamente 1,0 ppm en la solución preparada a partir de 200 mL del agua que se obtuvo previamente. Se midió el cloro total y libre del primer tratamiento cuando se dio el tiempo de contacto de 30 minutos. Se obtuvo que el valor de cloro total fue de $0,84 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ y el cloro libre de $0,75 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

Debido a que el tratamiento 2 y 3 se prepararon de la misma forma, se realizó un cuarto tratamiento. Este se utilizó considerando una fracción del volumen del tratamiento 2. Después del periodo de agitación rápida del agua que previamente se había tratado con cal y a la que se añadió cloro hasta alcanzar 1,0 ppm, se midió el pH de ambos tratamientos y se obtuvo que para el tratamiento 3 el pH fue de 11,60 y la temperatura de $21,9 \text{ }^\circ\text{C}$ en el tratamiento 4 el pH fue de 10,54 y la temperatura de $22,0 \text{ }^\circ\text{C}$.

4.3.3 Montaje de unidad de intercambio iónico para remoción de sulfato

4.3.3.1 Elección de la resina

Para elegir cuál de las resinas comercialmente disponibles permitiría ser utilizada como alternativa viable se siguió la siguiente metodología

1. Se investigó cuáles de las resinas son utilizadas para remover aniones.
2. A partir de ello se comprobó su uso/efectividad en el tratamiento de aguas contaminadas.
3. Se elaboró una lista de los posibles productos.
4. Se evaluó su capacidad de remoción de contaminante y el valor comercial.
5. Se seleccionó la resina según los criterios del punto 4.

Para este tipo de tecnología, las resinas con grupos aminos interactúan mayoritariamente con los iones sulfato. Esto es considerado como un criterio importante para su selección. El cuadro 4.8. muestra los detalles de la resina seleccionada para ser evaluada experimentalmente.

Cuadro 4.8. Características de la resina seleccionada.

Propiedades	Descripción
Nombre comercial	Amberlite®IRA910 - forma de cloruro
Temperatura máx. (°C)	40-77
Humedad (%)	54 – 61
Pérdida	~55 en el secado
Matriz	estireno-divinilbenceno (macrorreticular)
Grupo activo	Dimetiletanolamina
Tamaño de partícula	530 – 800 μm
pH operativo	0 – 14
Capacidad operativa	Superior o igual a 1,0 meq·mL ⁻¹ por volumen de filtro humedecido

4.3.3.2 *Ensayo de curva de ruptura*

4.3.3.2.1 Cálculo del volumen de agua a tratar

Se realizó una aproximación de las concentraciones de la fase de resina en el equilibrio de intercambio iónico por multicomponentes, según la metodología de Crittenden, Trussel, & Crittenden (2012). Esto debido a que en el agua existen interacciones y se da una competencia por los sitios de intercambio de la resina en el equilibrio. Por ello, fue necesario estimar la capacidad de la resina y la concentración de los iones intercambiables en la solución, esto para aproximar los valores de volumen de agua a tratar, así como el volumen de resina requerida para el ensayo, esto se realizó mediante la ecuación 4.5

$$q_i = \frac{q_T \cdot \alpha_p^i C_i}{\sum_{k=1}^N (\alpha_p^k \cdot C_k)} \quad (\text{ec. 4.5})$$

donde,

- q_i concentración de contraiones en la fase de resina, desde i hasta n ($\text{eq}\cdot\text{L}^{-1}$)
- q_T concentración total de iones en la fase de resina ($\text{eq}\cdot\text{L}_{\text{resina}}^{-1}$)
- C_k concentración del ion en la fase líquida ($\text{meq}\cdot\text{L}^{-1}$)
- α_p^i factores de separación con respecto al ion de presaturación ($p = \text{Cl}^-$)

Teniendo en cuenta que la capacidad de intercambio de la resina según datos del fabricante es mayor o igual a 1,0 miliequivalentes por mililitro de resina humedecida (ver cuadro 4.8). Se calcula el máximo volumen de agua que puede ser tratada por volumen de resina asumiendo condiciones de equilibrio. Para esto, en el cuadro 4.9 se presentan los aniones principales que contiene el agua de estudio. Además, se resumen los valores de α_p^i que igualmente se muestran en el cuadro 4.9, y también, los valores de q_i

Cuadro 4.9. Valores para la estimación del volumen de agua a tratar

Anión	α_p^i ¹	Concentración fase líquida, C_k		q_i $\text{eq}\cdot\text{L}^{-1}$
		$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$\text{meq}\cdot\text{L}^{-1}$	
HCO_3^-	0,27	168,25	3,37	0,013
SO_4^{2-}	9,1	344	7,16	0,964
Cl^-	1,0	53	1,50	0,022

¹ valores según (Crittenden, Trussel, & Crittenden, 2012)

Según la información recopilada en el cuadro 4.9, se procedió a estimar el volumen máximo de agua que puede ser tratado durante un ciclo antes que se alcance el punto de ruptura con respecto al sulfato, de acuerdo con la siguiente expresión

$$V_{max} = \frac{q_{\text{SO}_4^{2-}}}{C_{\text{SO}_4^{2-}}} = \frac{(0,964 \frac{\text{eq}}{\text{L}}) \cdot (10^3 \frac{\text{meq}}{\text{eq}})}{7,16 \frac{\text{meq}}{\text{L}}} = 134,64 \frac{L_{\text{agua}}}{L_{\text{resina}}}$$

Obtenido este valor, se procedió a asumir un empaque de columna de aproximadamente 5 mL de resina y, por lo tanto, se obtiene que podría ser capaz de tratar un máximo de 673,2 mL de agua. Con la intención de observar gráficamente la caída en la eficiencia de la resina por saturación de su lecho y conociendo que la capacidad de intercambio de la resina es superior o igual a un miliequivalente por litro de resina humedecida (ver cuadro 4.8.), se

aplicó un exceso de agua cercano al 20%, así se alcanzó un volumen a tratar de 800 mL. Sin embargo, para apreciar con claridad la saturación de la resina se consideró oportuno la aplicación de un volumen adicional del 50% de agua. De esta manera, el volumen total para la corrida fue de 1200 mL.

4.3.3.2.2 Preparación de la columna

El experimento se desarrolló usando una columna de vidrio cuyo diámetro interno fue de 11 mm y una altura de 250 mm que se rellenoó con 50 mm de la resina Amberlite® IRA 910 que correspondió a un volumen de lecho de $4,75 \text{ cm}^3$. Una vez empacada con resina nueva, se realizó un lavado de la resina utilizando 40 mililitros de ácido clorhídrico 0,5 molar y posteriormente se enjuagó la resina utilizando agua desionizada, pasando de un pH de 2 a uno cercano a 5, esto para remover el exceso de ácido en el medio. La prueba consistió en analizar la remoción de SO_4^{2-} a partir de una muestra inicial del agua de estudio con una concentración inicial (C_0) de $3,40 \text{ mmol SO}_4^{2-} \cdot \text{L}^{-1}$ que fue previamente caracterizada en el Laboratorio CEQIATEC.

El tratamiento inició pasando la muestra de agua contaminada con SO_4^{2-} a través del lecho de resina preparado mediante flujo descendente. El caudal se mantuvo constante a un valor de $11,63 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ utilizando una botella de Mariotte que contenía la muestra de agua con sulfato hasta la columna donde se encontraba la resina propuesta para el intercambio. La concentración de sulfato en el efluente fue determinada mediante la recolección de muestras de agua a intervalos de tiempo de 2,5 minutos que correspondían a 30 mililitros de muestra en el efluente del sistema. Este proceso se realizó hasta alcanzar una saturación de la resina y observar una concentración de sulfato en el efluente igual a la concentración inicial.

Para el desarrollo de este ensayo, se preparó un equipo tal y como se aprecia en la figura 4.2. con la intención de obtener un sistema capaz de realizar corridas del agua cruda a través de la resina de intercambio manteniendo un flujo constante durante el experimento. Lo segundo, fue realizar el empaque de la columna, para ello se empacó un lecho húmedo de resina de aproximadamente 5 mL. Se cargó el recipiente de agua cruda del sistema con aproximadamente 1,2 L y se inició la corrida. A partir del agua de alimentación, se reservaron volúmenes de muestra a la salida de la columna empacada con resina, estas muestras fueron

de 30 mL aproximadamente y fueron tomadas hasta completar los 1200 mL del agua a tratar, para un total de 40 muestras, estos recipientes con la muestra de agua fueron debidamente rotulados de acuerdo con el orden en que fueron obtenidos. El tiempo que tardó en pasar el volumen de agua a través de la columna fue de 103 minutos aproximadamente.

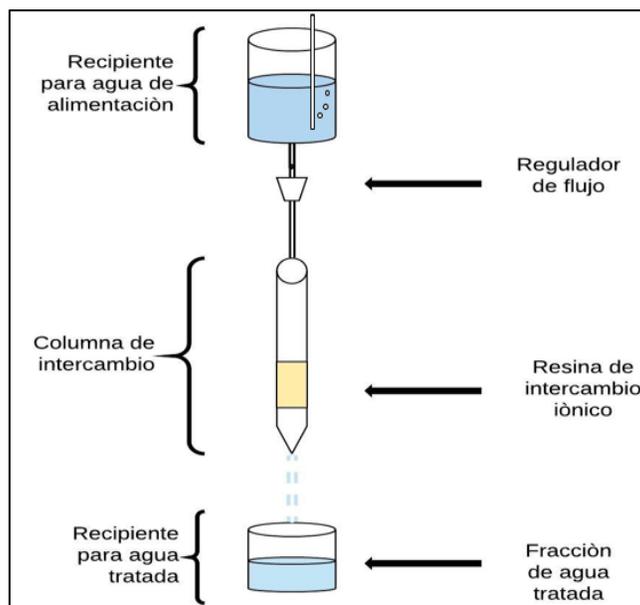


Figura 4.2. Esquema del sistema de columna de intercambio iónico a escala de laboratorio

4.3.3.3 Modelación de la curva de ruptura

Mediante revisión de literatura se observó como los modelos matemáticos empíricos pueden predecir el comportamiento de la curva de ruptura. En este caso, González (2017) destaca que los modelos de ajuste ideal se pueden aplicar fácilmente y permiten un escalamiento de la curva de ruptura, eso sí, se deberá mantener fijo el tiempo de contacto. No obstante, demanda la necesidad de realizar mayor cantidad de ensayos para predecir o escalar el comportamiento a diferentes condiciones operativas. Mismas que no se realizan en el presente estudio, pues se limita a evaluar la resina a una condición específica en la que se evalúa si altas tasas de flujo limitan la capacidad operativa de la resina.

4.4 DISEÑO DE SISTEMAS PARA LA POTABILIZACIÓN DE AGUA

A partir de la evaluación de la calidad y cantidad del recurso hídrico de las nacientes que son aprovechadas por el acueducto rural de la ASADA Santa Cruz de Turrialba, se han determinado cuales son las bases para realizar la propuesta de tratamiento para la reducción del contenido de dureza total y sulfatos. El enfoque considera la calidad y disponibilidad del recurso hídrico de las nacientes “Caragra” y “La Quebrada” como fuentes de agua que en conjunto con la captación “El Tirrá” cumplan con las necesidades de recurso hídrico para abastecer a los usuarios del servicio.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 OFERTA DEL RECURSO HÍDRICO DISPONIBLE

Se tuvo acceso a los registros históricos con los que cuenta el Acueducto Rural de Santa Cruz de Turrialba, para el aforo de sus captaciones Caragra, El Cedro, La Quebrada y El Tirrá desde enero del año 2015 hasta abril del 2018 (apéndice 2). Con estos datos, que se complementan los registros que el investigador obtuvo durante los aforos realizados en el año 2017 (apéndice 3), se obtuvieron los valores del caudal promedio mensual desde agosto del año 2017 hasta abril del 2018. Con esta información se construye el cuadro 5.1 y 5.2 donde se muestra el caudal reportado por cada naciente, el mes y el año en que se realizaron los aforos. Para el año 2015, se realizaron aforos únicamente durante el primer semestre y agosto. En el año 2016 cuenta con los registros de aforos más completos de los 4 años en estudio, solamente en el caso de la naciente “La Quebrada” el aforo se vio interrumpido del mes de junio a setiembre. En el caso del 2017, la ASADA únicamente registra datos en enero y diciembre. Para el 2018 se han documentado los aforos del primer cuatrimestre, con la excepción del mes de enero.

Entonces, a partir de la información disponible se observa que para los últimos 5 meses del año 2017 y para el primer cuatrimestre del 2018, con excepción de enero, se reporta un incremento en la oferta del recurso hídrico comparativamente con los mismos periodos de los años anteriores. Por otra parte, los meses con menor caudal registrado corresponden a los

de junio a setiembre del 2016, particularmente en estos meses no se contaba con el registro del aforo de la naciente “La Quebrada” y sumado a este periodo, en enero de 2017, la naciente “El Cedro” no contaba con el registro de aforo, situación que disminuyó el valor promedio reportado.

Debido a algunas condiciones desfavorables en las que se tuvo que realizar los aforos, como lo son las condiciones topográficas donde se ubica cada captación, altas pendientes, nacientes ubicadas sobre quebradas con una inestabilidad debido al movimiento de las rocas, por el hecho que se identificó al menos una válvula en una de las captaciones en mal estado, impidiendo detener el flujo a través de la línea de conducción. Se podría considerar una incertidumbre elevada para los valores de aforo registrados. Sin embargo, se realizó esta actividad para contar con datos de referencia y poder de esta manera, compararlos con los registros históricos.

Cuadro 5.1. Registro de aforos de las nacientes captadas por el acueducto rural de Santa Cruz de Turrialba de los años 2015 y 2016.

Mes	Caudal (L·s ⁻¹) - Año 2015					Caudal (L·s ⁻¹) - Año 2016				
	Caragra	El Cedro	La Quebrada	El Tirrá	Total	Caragra	El Cedro	La Quebrada	El Tirrá	Total
Enero	13,3	9,2	3,5	12	38	10,8	12	3,5	11,9	38,2
Febrero	9,9	12	3,6	15,3	40,8	9,3	11,6	3,9	12,5	37,3
Marzo	8,9	15,3	3,7	15,6	43,5	9,6	12,2	3,4	12,1	37,3
Abril	9,5	10,5	3,7	11	34,7	9,5	10,5	3,7	14,7	38,4
Mayo	7,4	13,3	3,9	10,5	35,1	7,9	11,3	3,9	11,9	35
Junio	8	15	3,8	12,5	39,3	9,06	10,25	N.R	8,74	28,05
Julio	N.R	N.R	N.R	N.R	N.R	8,99	11,44	N.R	7,88	28,31
Agosto	8,06	13,1	3,4	15,7	40,26	9,95	14,39	N.R	8,36	32,7
Setiembre	N.R	N.R	N.R	N.R	N.R	9,63	10,06	N.R	6,92	26,61
Octubre	N.R	N.R	N.R	N.R	N.R	14,07	7,76	3,58	11,49	36,9
Noviembre	N.R	N.R	N.R	N.R	N.R	8,2	18,52	4,02	12,05	42,79
Diciembre	N.R	N.R	N.R	N.R	N.R	9,06	12,18	2,59	13,16	36,99
Promedio	9,29	12,63	3,66	13,23	38,81	9,67	11,85	3,57	10,98	36,07
Desviación Estándar	1,97	2,24	0,17	2,25	6,64	1,58	2,63	0,45	2,4	7,06

N.R. = Valor no registrado

Cuadro 5.2. Registro de aforos de las nacientes captadas por el acueducto rural de Santa Cruz de Turrialba de los años 2017 y 2018.

Mes	Caudal (L·s ⁻¹) – Año 2017					Caudal (L·s ⁻¹) – Año 2018				
	Caragra	El Cedro	La Quebrada	El Tírrá	Total	Caragra	El Cedro	La Quebrada	El Tírrá	Total
Enero	7,12	3,58	3,58	11,5	25,78	N.R	N.R	N.R	N.R	N.R
Febrero	N.R	N.R	N.R	N.R	N.R	11,4	14,83	8,72	14,49	49,44
Marzo	N.R	N.R	N.R	N.R	N.R	14,74	13,20	9,52	13,86	51,32
Abril	N.R	N.R	N.R	N.R	N.R	10,13	13,21	8,28	11,14	42,75
Mayo	N.R	N.R	N.R	N.R	N.R	-	-	-	-	-
Junio	N.R	N.R	N.R	N.R	N.R	-	-	-	-	-
Julio	N.R	N.R	N.R	N.R	N.R	-	-	-	-	-
Agosto	10,87±1,28	16,86±2,18	7,76±1,71	14,15±2,42	49,63	-	-	-	-	-
Setiembre	11,28±0,71	14,92±1,01	9,07±0,34	13,52±1,71	48,78	-	-	-	-	-
Octubre	10,18±1,39	14,91±1,40	8,30±0,33	13,98±0,73	47,37	-	-	-	-	-
Noviembre	9,47±1,17	12,81±0,98	8,04±0,59	13,37±2,17	43,68	-	-	-	-	-
Diciembre	10,02±1,12	13,68±1,46	8,35±0,68	12,10±1,97	44,15	-	-	-	-	-
Promedio	9,82	12,79	7,52	13,1	43,23	12,09	13,75	8,84	13,16	47,84
Desviación Estándar	1,47	4,72	1,98	1,07	9,23	2,38	0,94	0,63	1,78	5,74

Con base en la información del cuadro 5.1 y 5.2 se puede observar que para el año 2015 el promedio total de agua captada corresponde a $(38,81 \pm 6,64) \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ mientras que para 2016, el 2017 y lo registrado para el 2018 se tienen valores de $(36,07 \pm 7,06)$, $(43,23 \pm 9,23)$ y $(47,84 \pm 5,74) \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ respectivamente. Para el 2015 el valor de caudal mínimo registrado fue para abril con un valor de $34,70 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ y como máximo en el mes de marzo con un total de $43,5 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$. De igual manera, para los años 2016, el valor más bajo fue de $26,61 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ en setiembre y un máximo de $42,79 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ para noviembre. En el 2017 el valor inferior se presenta en el mes de enero con $25,78 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ mientras que el valor superior lo tiene el mes de agosto con $49,63 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$. Por último, los valores disponibles para 2018 presentan un valor mínimo de $42,75 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ en el mes de abril y el valor más alto en el mes de marzo, siendo este dato el más alto de todos los años en comparación para un valor de $51,32 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$. Desde el mes de agosto de 2017 se presenta una tendencia que muestra un incremento en los registros de los valores de caudal, pues se cuentan con los aforos de las 4 captaciones, además que, se ha trabajado con un recipiente con volumen conocido. Situación que ha contribuido a aproximar de mejor manera el valor de caudal en cada nacimiento. Al contar con registros de caudales totales captados de forma regular durante aproximadamente tres años y medio, se elaboró un histograma de frecuencia relativa y acumulada, la figura 5.1 con este gráfico se pudo determinar que aproximadamente el 80% de las mediciones de caudales son menores a los $13,97 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ y alrededor del 50% de los datos son para caudales que se encuentran entre los $9,42$ y los $13,97 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$.

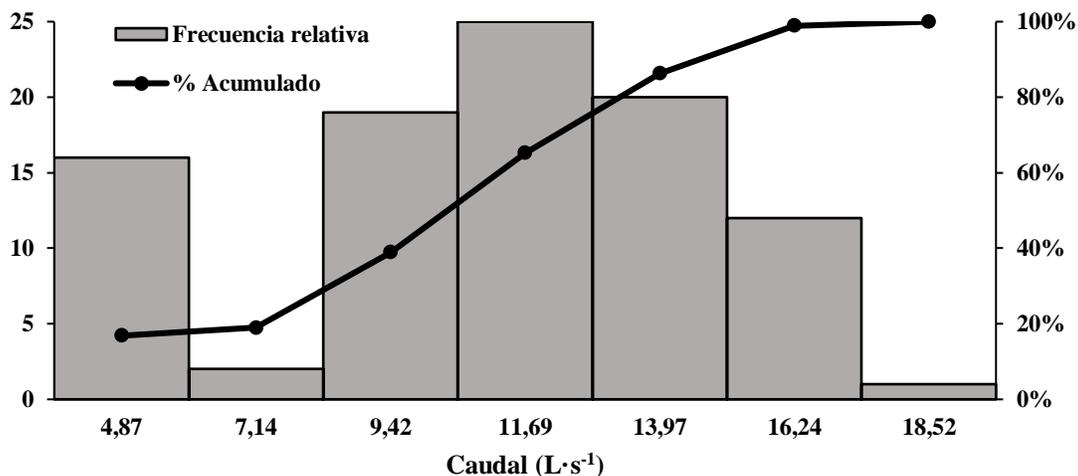


Figura 5.1. Histograma de los caudales reportados durante los aforos comprendidos entre los años 2015 y 2018.

La confiabilidad y utilidad de los valores obtenidos se está viendo comprometida debido a las condiciones actuales en las que se realiza el aforo en las captaciones. Durante las visitas de campo efectuadas, se constató las dificultades que están presentes, esto pone en una situación comprometedora la integridad de los encargados de aforar las nacientes. En el apéndice 3 se muestran los registros fotográficos de los sitios en los cuales se realizan los aforos. Por otra parte, con base en la descripción que se realizó en la sección en la metodología con respecto a los espacios donde se realizan mediciones de caudal se elaboró el cuadro 5.3 que describe la situación y riesgos que limitan la confiabilidad de los valores obtenidos y se dan sugerencias u oportunidades de mejora del aforo en cada captación.

Cuadro 5.3. Descripción de riesgos y oportunidades de mejora para los aforos en captaciones que emplea la ASADA Santa Cruz de Turrialba.

Captación	Riesgos	Oportunidad de mejora
Caragra	Es un sitio de acceso complicado, ya que debe realizarse el aforo sobre la quebrada, en un terreno con pendiente e inestabilidad debido a las rocas que se encuentran y genera un riesgo de caídas. La tubería de conducción, así como troncos y rocas genera obstáculos para colocar el recipiente de aforo.	Añadir una sección de tubería en la línea que se utiliza para medir los aforos hasta un sitio fuera de la quebrada, de esta manera se podrá incluso montar una estructura en concreto que permita regular el nivel del suelo en el que se coloque el recipiente para aforo.
El Cedro	Captación que presenta situaciones similares a la Naciente Caragra, donde la inestabilidad del terreno, tuberías ubicadas sobre la quebrada, rocas y vegetación generan una complicación adicional al momento de realizar los aforos	Trasladar el sitio de aforo hasta una sección en donde se pueda instalar un accesorio de tipo tee seguido de una válvula que restrinja el paso de la línea de conducción hacia el tanque de reunión. De esta manera, tal como se realiza en la naciente La Quebrada permita desviar el caudal de manera que al montar una superficie nivelada en concreto permita colocar el recipiente de aforo y permita obtener datos más cercanos al real.

Continuación del cuadro 5.3

Captación	Riesgos	Oportunidad de mejora
La Quebrada	Presenta las condiciones más favorables para realizar el aforo, como único detalle que afecta la medición del caudal es que no se cuenta con una superficie en la que se pueda colocar el recipiente de aforo que genere una estabilidad y no se desnivele tal recipiente. Además, presenta conexiones de tuberías posteriores al sitio de aforo, lo que agrega incertidumbre a la medición.	Instalar un piso en concreto, de esta manera se contará con una superficie que contrarreste los posibles desniveles al momento de colocar el recipiente para medir volumen de agua.
El Tirrá	No se cuenta con las mejores condiciones para realizar el aforo, debido a que la válvula que conduce al tanque de reunión se encuentra dañada, esto impide un cierre efectivo del paso de agua al momento de tomar el aforo. Además de que no existe una superficie a nivel donde se pueda colocar el recipiente para aforo.	Realizar la reparación de la válvula respectiva, así como la instalación de una superficie a nivel que permita colocar el recipiente

Adicionalmente, se sugiere contar con recipientes de aforo respectivamente calibrados y apropiados a los volúmenes de agua que actualmente se manejan. Esto porque durante los aforos se observan pérdidas de agua por rebalse debido a la presión con que sale el agua a través de la tubería y el limitado volumen del recipiente para el aforo.

En Costa Rica, uno de los sectores que se considera más vulnerable ante los efectos del cambio climático lo conforma el recurso hídrico, sector relacionado con la utilización de agua para consumo humano doméstico, saneamiento y la agricultura. Se espera que los impactos estén relacionados directamente con cambios en la temperatura y el régimen de precipitaciones. Lo cual, puede tener repercusión en la provisión de agua potable ya que, podrían darse alteraciones en los periodos de precipitaciones que ocasionen que no se abastezca de manera adecuada los mantos acuíferos (Herrera J. , 2017)

Por esta razón, se considera oportuno contemplar la información relacionada con las precipitaciones, se tomaron los datos aportados por la estación meteorológica más cercana

ubicada en Capellades de Alvarado aproximadamente a 4,8 km de la zona de estudio. En la figura 5.2 se muestran como han variado las precipitaciones en los últimos 5 años. Se pone especial atención en los años 2013 y 2016 pues representan los periodos con menor precipitación. Por otra parte, los años 2015 y 2017 se muestran en promedio como los años con más cantidad de lluvia. Con relación a los meses con menor lluvia, se identifican los meses de enero a abril. No obstante, se muestra gran variabilidad en el comportamiento de las precipitaciones, situación que impide definir los periodos con aumentos o disminuciones de las lluvias.

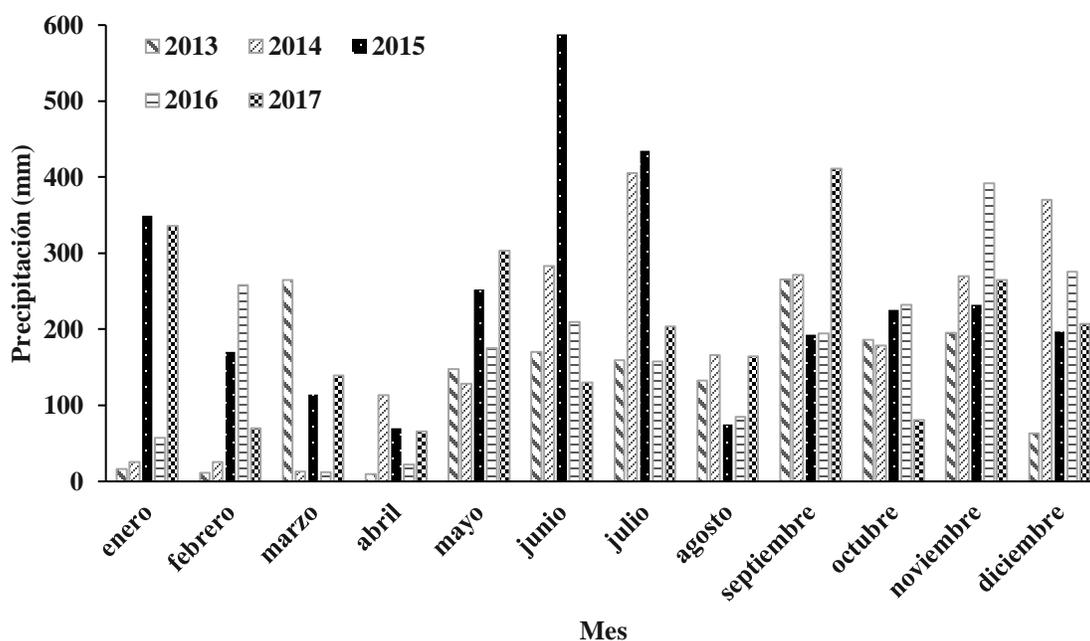


Figura 5.2. Comportamiento de las precipitaciones registradas por la estación meteorológica de Capellades de Alvarado, periodo comprendido del 2013 al 2017.

Además, en la figura 5.3 se realiza una comparación de la precipitación con respecto a los caudales medidos en las nacientes en estudio, considerando los años 2016 y 2017, pues representativamente son los años en los que se cuenta con un mayor registro de aforos.

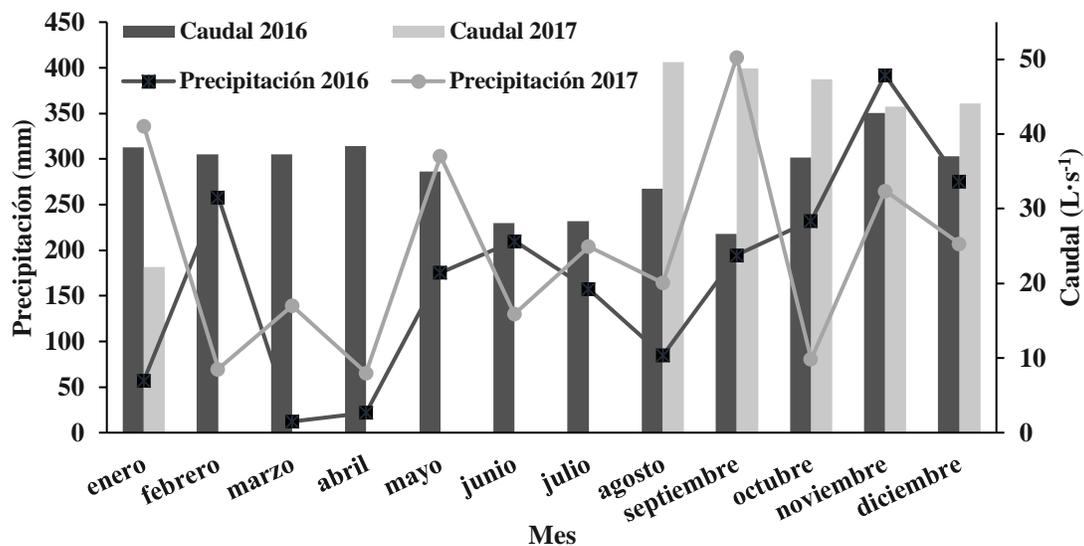


Figura 5.3. Comparación de caudales y precipitación para los años 2016 y 2017

En la figura 5.3 se puede observar como en el año 2016 los caudales reportados se muestran relativamente similares, siendo los meses de junio, julio y setiembre los que reportan una menor oferta del recurso hídrico, sin embargo, esto obedece a que durante estos meses no se realizó el aforo de la naciente La Quebrada, situación que podría justificar tal reducción. Por otro lado, si se puede observar como en el mes de noviembre del mismo año corresponde al periodo con mayor oferta de agua captada, acompañado también de ser el mes con mayor registro de precipitación en la zona. Durante el año 2017, específicamente en los meses de febrero a julio, no se realizaron aforos por parte del Acueducto. Para los meses de agosto a diciembre los caudales registrados corresponden a los efectuados por el investigador del proyecto. Se puede observar como para setiembre, uno de los meses con mayor precipitación, se muestra comparativamente con el registro de precipitación más elevado del año.

Por último, se presenta en el cuadro 5.4. el resumen de los caudales promedio que ofrecen las nacientes según los años en los que se han reportado sus aforos.

Cuadro 5.4. Resumen de caudal promedio ofertado por las nacientes captadas por el acueducto rural de Santa Cruz de Turrialba.

Año	Caudal Nacientes (L·s ⁻¹)				Caudal total
	Caragra	El Cedro	La Quebrada	El Tirrá	
2015	9,29	12,63	3,66	13,23	38,81
2016	9,67	11,85	3,57	10,98	36,07
2017	9,82	12,79	7,52	13,10	43,23
2018	12,09	13,75	8,84	13,16	47,84
Promedio	10,22	12,75	5,90	12,62	41,49

Como tal, se puede observar que, en términos de volumen de agua disponible, las nacientes con mayor capacidad de aportar este recurso son la naciente “El Cedro” y “El Tirrá” con valores de 12,75 y 12,62 L·s⁻¹ respectivamente. También es posible observar como el caudal total reportado en promedio para cada año presenta una tendencia creciente. Hecho que en primera instancia se puede deber a la mejora en la técnica del aforo realizado, evitando así, pérdidas involuntarias de agua al momento de tomar los datos. O bien, se puede deber a una mayor cantidad de volumen generado por cada una de las nacientes. Es importante señalar en este punto que, el volumen de agua disponible con respecto a los habitantes de las comunidades abastecidas da un valor de 896 Litros por habitante al día.

5.2 ANÁLISIS DE LA CALIDAD DEL AGUA CAPTADA

Para la evaluación de la calidad del agua que dispone el Acueducto Rural de Santa Cruz de Turrialba, en el cuadro 5.5. se presenta el promedio de los registros de análisis de laboratorio que se han realizado históricamente por la ASADA desde el periodo 2009 hasta el 2016, específicamente para sus captaciones, en el apéndice 4 se muestra la información detallada de estos resultados.

Cuadro 5.5. Registro histórico de los análisis de laboratorio realizados por el acueducto rural de Santa Cruz de Turrialba.

Parámetro (mg·L⁻¹)	Caragra	El Cedro	La Quebrada	El Tirrá	Valor máx. admisible
Calcio	68,85	71,63	68,60	46,58	100
Magnesio	55,38	59,46	56,90	35,86	50
Sulfato	292,64	303,49	281,53	154,51	250
Dureza Total	412,20	428,60	415,00	275,60	400
Potasio	13,57	13,33	N.R	9,08	10

Se puede observar en el cuadro 5.5. que el promedio de los datos disponibles desde el año 2009 y hasta el 2016 indican que existen sustancias en el agua que exceden los parámetros permisibles en la normativa actual del país, siendo estas captaciones las que utiliza el acueducto para abasto de la población.

Por otra parte, en el cuadro 5.6. se hizo un especial seguimiento al calcio, magnesio, potasio y sulfatos de cada nacimiento, sustancias presentes en el agua con valores que en reiteradas ocasiones se encontraban por encima del valor máximo admisible según el Reglamento para la Calidad del Agua Potable de Costa Rica. Como parte del presente trabajo, se realizaron análisis de laboratorio de la calidad del agua, por parte del proyectista, para las captaciones del periodo de agosto a diciembre del año 2017 tal y como se muestra en el cuadro 5.6. Estos datos se presentan como el valor promedio de estas mediciones.

Cuadro 5.6. Concentración promedio de los contaminantes por nacimiento

Parámetro	Caragra	El Cedro	La Quebrada	El Tirrá	Tanque de Reunión	Valor máx. admisible
Calcio (mg·L ⁻¹)	84,00	86,40	85,30	52,90	74,10	100
Magnesio (mg·L ⁻¹)	66,80	71,70	69,00	35,70	57,10	50
Sulfato (mg·L ⁻¹)	347,40	353,90	347,00	164,00	285,00	250
Dureza Total (mg·L ⁻¹)	487,11	518,00	504,44	277,89	419,56	400
Potasio (mg·L ⁻¹)	15,56	14,44	13,78	8,87	12,56	10
pH	5,82	6,02	5,70	5,66	5,74	6 a 8
Temperatura (°C)	24,40	22,92	21,82	19,12	21,39	18 a 30

Del cuadro 5.6, se observa como para el periodo de agosto a diciembre del 2017, como parte de los análisis realizados por el proyectista, el calcio presenta valores por debajo del máximo admisible, Sin embargo, el magnesio presenta valores elevados, situación que conlleva a un valor elevado de dureza total que ocasiona se encuentre por encima de lo establecido en la legislación vigente. En cuanto al sulfato, este presenta valores que están fuera del límite superior permitido para la mayoría de las nacientes, para el tanque de reunión y para su valor promedio. De igual manera sucede con el potasio. El pH medido en campo muestra valores ácidos y por debajo del límite inferior que establece el marco normativo del país.

Se hace especial atención en la naciente El Tirrá, pues comparativamente, es una naciente que no se comporta de la misma manera que las otras captaciones. Al observar la figura 4.1. se debe considerar que esta naciente se encuentra al margen derecho de un pequeño río que se encuentra en la finca donde se ubican las nacientes, hecho que contrarresta con las demás nacientes ubicadas al margen izquierdo. Las causas que ocasionan este fenómeno requieren de otro tipo de análisis que no son contemplados en esta investigación. Con base en los resultados de los análisis efectuados durante el 2017, se realizó una estimación de la relación que presentan estos contaminantes, como se muestra en el cuadro 5.7. para ello, se tomó el sulfato como parámetro para realizar la estimación de los coeficientes de relación.

Cuadro 5.7. Coeficientes de correlación entre el sulfato y parámetros de calidad del agua con valores por encima de la norma nacional.

Variable	Dureza Total	Potasio	Temperatura	Caudal	pH
Sulfato	0,9492	0,8946	0,4636	0,8000	-0,3102

El resultado en el cuadro 5.7. muestra como existe una correlación más marcada entre la dureza total y el sulfato. Esto permite afirmar, que entre las variables existe una dependencia importante y no está asociada significativamente a las otras variables analizadas. Dado este comportamiento es que el interés es realizar un estudio tal como se muestra en las figuras 5.4 y 5.5. como el ion sulfato presenta un valor más elevado con respecto a la reglamentación vigente. De la misma manera, se evalúa la dureza total, según cada naciente y su comparación frente a la normativa vigente.

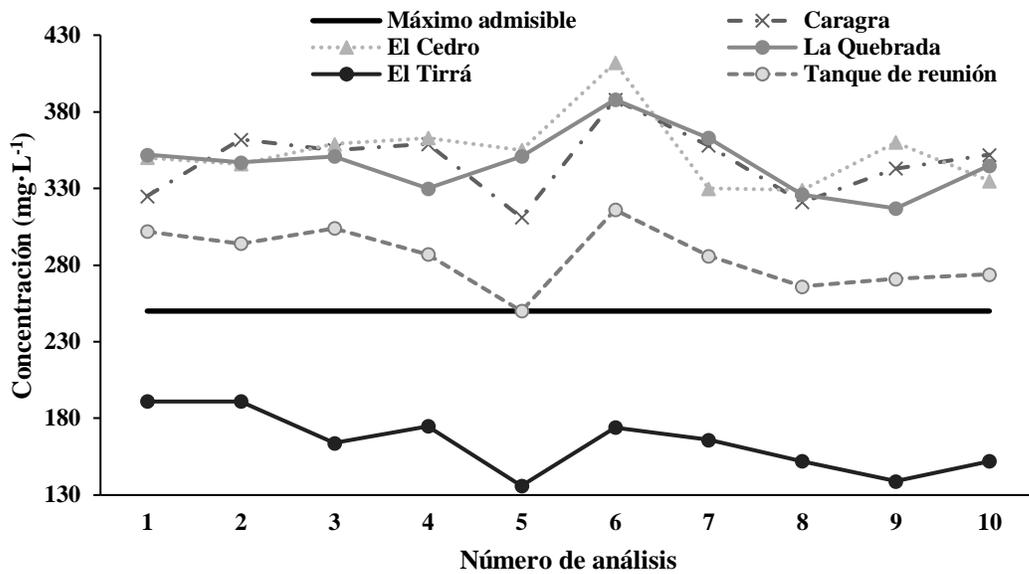


Figura 5.4. Comportamiento de la concentración de Sulfato.

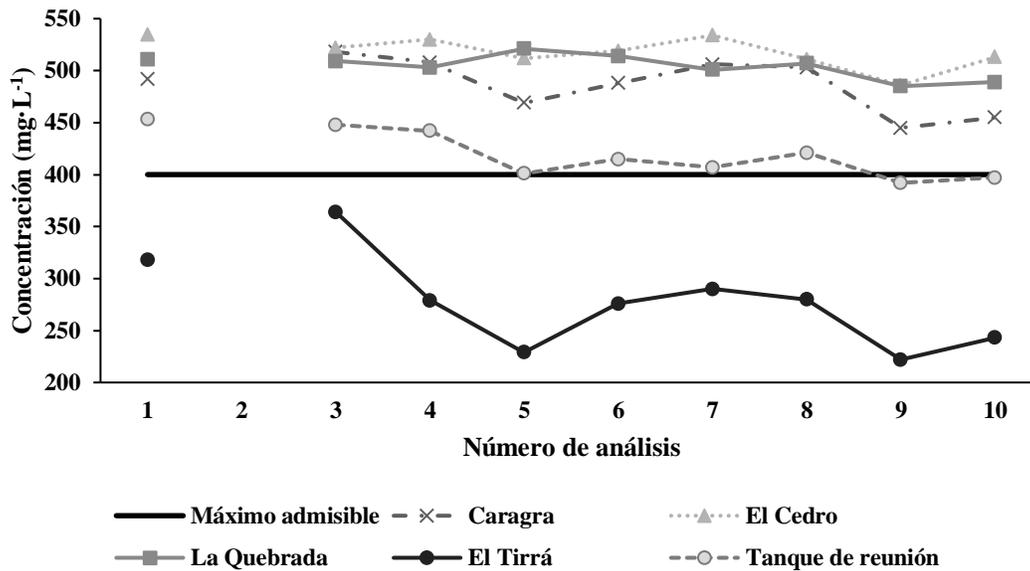


Figura 5.5. Comportamiento de la concentración de Dureza Total.

Basado en los resultados anteriores, se determinó que la captación El Cedro presenta los valores más elevados de sulfato y dureza total a lo largo del estudio efectuado tal y como se muestra en el cuadro 4.3. con los promedios de cada uno de los puntos de muestreo. Siendo esta naciente la que presenta la segunda mayor oferta de caudal disponible. Mientras que la

naciente con valores por debajo del valor máximo que exige el reglamento corresponde a la naciente El Tirrá, siendo esto un caso muy favorable, debido a que es la naciente que presenta el mayor caudal disponible con respecto a las restantes nacientes que son parte del estudio. De acuerdo con los resultados, es necesario que la ASADA realice un control constante de estos parámetros de manera que se esté evaluando la calidad del recurso hídrico que se abastece a la población.

5.3 ANÁLISIS DE LA DEMANDA ACTUAL DE AGUA POTABLE

De acuerdo con la información de consumo recopilada, la cual es registrada por el Acueducto a partir de las lecturas mensuales de los sistemas de micro medición instalados. Además, con el proyecto que fue iniciado en octubre del 2016 y la instalación de los primeros equipos de lectura del consumo para sus abonados, en el mes de abril del 2018 registra un total de 201 micromedidores instalados, este valor representa un 18% del total de abonados (activos e inactivos) o bien, un 22% del total de abonados activos. En la figura 5.6. se evidencia como fue el comportamiento del consumo de agua durante el periodo comprendido entre setiembre del 2017 y abril del 2018, se obtuvo en promedio un consumo de 190 L·(persona· día)⁻¹, para el mes de setiembre fueron 199 y en abril fue de 242 L·(persona· día)⁻¹.

De acuerdo con datos del ICAA, mencionado por Ureña (2016), las dotaciones establecidas para poblaciones de tipo rural son de (150-250) L·(persona· día)⁻¹ y para población urbana el rango va de los (250-300) L·(persona· día)⁻¹. Como se observa, estos datos permiten asegurar que la población abastecida por la ASADA Santa Cruz de Turrialba presenta un consumo que se ajusta a los valores establecidos por las autoridades competentes.

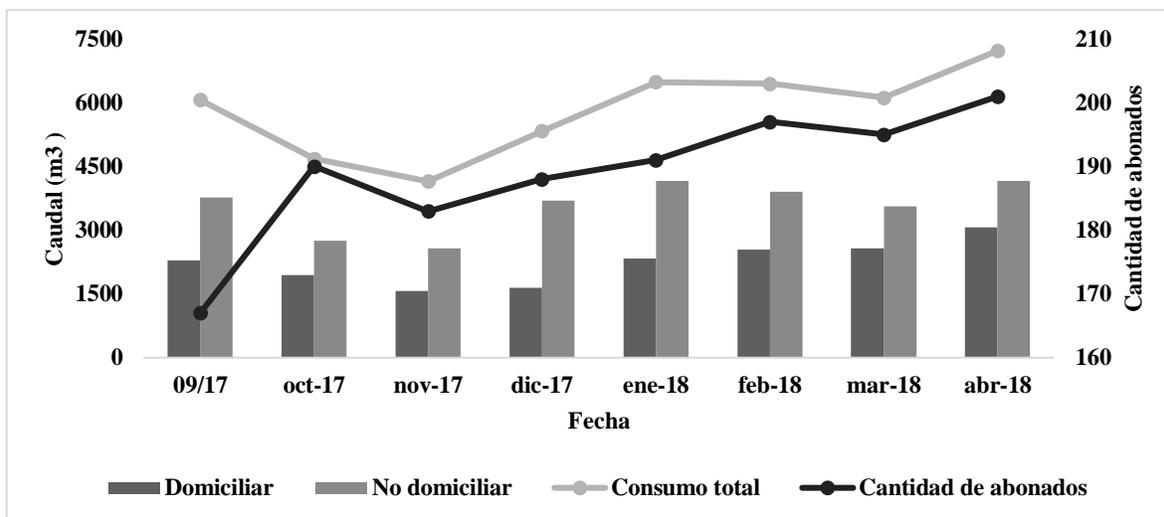


Figura 5.6. Consumo de agua potable mensual de acuerdo con el registro de la cantidad de abonados con micro medición instalada del mes de setiembre de 2017 al mes de abril de 2018.

Según datos que maneja el acueducto, existe un total de 1106 conexiones activas e inactivas. Sin embargo, la micro medición instalada se ha realizado solamente en 201 conexiones para el mes de abril de 2018. Situación que impide realizar una contabilidad real del consumo de agua que realizan sus abonados. Como se observa en la figura 5.6 el incremento en el consumo de agua facturado está relacionado directamente con el incremento de medidores de consumo instalados el cual es el comportamiento esperado conforme se incremente la cantidad de equipos en funcionamiento. El hecho que se debe resaltar en este gráfico es como el consumo de agua es superior para los usuarios no domiciliarios, compuesto por los abonados que destinan el agua para uso comercial, especial e industrial. Se observa como el consumo domiciliar es el que presenta una tendencia al crecimiento, esto obedece a que el proyecto de instalación de micro medición inició con la colocación de los equipos a los usuarios no domiciliarios como una primera etapa, debido a que era de conocimiento del Acueducto que eran estos usuarios del servicio los que realizaban un mayor consumo del recurso que se disponía para el total de abonados. Por este motivo, es que se cuenta con un amplio porcentaje cubierto por esta categoría, y el proyecto hoy en día ha puesto su atención en la instalación de los lectores de consumo en los usuarios domiciliarios.

Haciendo uso de la información disponible de micro medición, ver apéndice 5, se elabora el cuadro 5.8 para estimar el consumo por persona al mes y persona por día, se tomó como

indicador el valor que indica el INEC de 3,4 habitantes por vivienda para el distrito de Santa Cruz de Turrialba.

Cuadro 5.8. Datos de consumo promedio y per cápita para los sistemas de micro medición instalados por la ASADA Santa Cruz de Turrialba.

Fecha (mm-aa)	DOMIPRE (m ³)	EMPREGO (m ³)	DOMIPRE		EMPREGO	
			m ³ . (persona·mes) ⁻¹	L. (persona·día) ⁻¹	m ³ . (persona·mes) ⁻¹	L. (persona·día) ⁻¹
09-17	19	84	5,5	184	25	823
10-17	14	54	4,1	137	16	528
11-17	11	57	3,4	112	17	561
12-17	12	80	3,4	113	24	787
01-18	16	92	4,7	156	27	906
02-18	17	87	4,9	164	26	851
03-18	17	83	5,0	166	24	811
04-18	20	95	5,7	191	28	927
Promedio	16	79	5,0	153	23	774

Como se observa en el cuadro 5.8 el consumo promedio para una persona al día en el caso del abonado de tipo DOMIPRE cumple con los criterios establecidos por el ICAA en cuanto al rango de dotación para poblaciones rurales mencionado anteriormente en esta misma sección. Por otra parte, el abonado de tipo EMPREGO registra un valor promedio de 744 litros por habitante al día, dato que es prácticamente 3 veces más el valor superior recomendado para las dotaciones de tipo rural. Esta situación muestra como un tipo de usuario, el cual es minoritario en cantidad de abonados registrados, realiza un consumo del recurso hídrico disponible que puede poner en riesgo la estabilidad de la prestación del servicio a los demás usuarios. Bajo este panorama, el Acueducto Rural de Santa Cruz de Turrialba requiere en promedio al menos 31 metros cúbicos de agua al mes por cada abonado, lo que representa, (302 ± 50) litros por habitante al día. Considerando el valor de consumo para cada abonado, se podría aproximar que, para la totalidad de abonados, 933, el consumo mensual en metros cúbicos representa un valor de 28.711. Este valor indica que se requieren alrededor de un caudal 11,08 litros de agua por segundo para satisfacer los requerimientos de la población.

Si bien es cierto, el cuadro 5.8 se realizó únicamente con los datos de la población abastecida que cuenta con sistema de micro medición instalada y no existe la posibilidad de estimar el consumo total de la población debido a que no existe un mecanismo que permita contabilizar el consumo de los abonados restantes, tampoco para identificar pérdidas, fugas,

conexiones ilegales, errores en lecturas, mal funcionamiento de los micromedidores. Además, no se cuenta con equipo de macro medición que permita realizar un mejor control de estos factores mencionados. Hechos que provocan que la cantidad del recurso hídrico que se suministra a la población carezca de precisión y que el valor incluso pueda ser superior al estimado.

5.3.1 Proyección de la demanda futura

De acuerdo con la información brindada por el INEC, con respecto a datos demográficos del distrito de Santa Cruz de Turrialba, cubierto por el Acueducto Rural de Santa Cruz, se muestran el cuadro 5.9 las tasas de crecimiento poblacional.

Cuadro 5.9. Índices de crecimiento poblacional para el distrito de Santa Cruz de Turrialba

Censo	Población	Tasa de crecimiento según método (%)				
		Lineal o aritmético	Geométrico	Geométrico simplificado (Bocaz)	Logarítmico	Promedio
1973	2492	-	-	-	-	-
1984	2659	0,61	0,59	0,59	0,59	0,59
2000	3421	1,79	1,59	1,57	1,57	1,63
2011	3208	-0,57	-0,58	-0,58	-0,58	-0,58

A partir de estos valores, se realizaron las estimaciones que muestran el comportamiento de la proyección futura de la población y estos se presentan resumidos en el cuadro 5.10 para cada método empleado. En el apéndice 6 se presentan las estimaciones para la totalidad de los años, a partir del 2020 y hasta el 2040.

Cuadro 5.10. Datos de población futura para el distrito de Santa Cruz de Turrialba.

Método	Tasa de crecimiento anual (%)	Año				
		2020	2025	2030	2035	2040
Lineal o aritmético	-	3034	2937	2840	2743	2646
Geométrico	-0,58	3044	2956	2871	2788	2708
Logarítmico	-0,58	3415	3536	3661	3952	3925

Se puede observar como el comportamiento general es hacia la disminución de la población para el distrito de Santa Cruz, situación que obedece al resultado de los censos para el año 2000 y 2011 en el que se presentó una disminución de la población de la zona. Caso contrario se observa para el método logarítmico en que la población aumenta y pasa de los 3208 a los 3925 del año 2011 al 2040 respectivamente. En la figura 5.7. se observa el comportamiento de las proyecciones

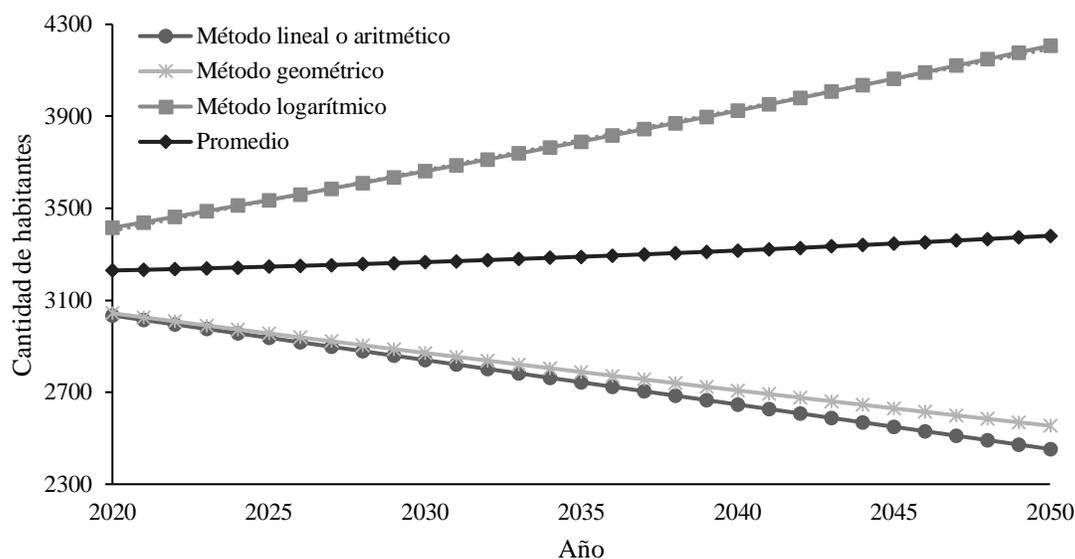


Figura 5.7. Comportamiento de la población futura del distrito Santa Cruz de Turrialba

5.3.2 Cálculo del consumo futuro de agua

Del cuadro 5.8 el consumo promedio es de 302 ± 50 litros por persona al día, de esta manera, se asume una dotación neta de 325 litros por persona al día. Con este valor, se presenta la dotación bruta en el cuadro 5.11. asumiendo porcentajes de pérdidas del recurso hídrico desde 12,5%, 20,0% hasta un 25% según las recomendaciones del ICAA y el Instituto de Fomento y Asesoría Municipal, IFAM, mencionado por Ureña (2016).

Cuadro 5.11. Resultados de la estimación de la dotación bruta.

Aspecto	Valor			
	0	12,5	20	25
Porcentaje de pérdidas (%)	0	12,5	20	25
Dotación Bruta (L·persona ⁻¹ ·día ⁻¹)	325	371	406	433

Para el valor máximo, asumiendo de un 25% de pérdidas como límite superior, la dotación sería de 433 litros por persona al día, valor que según la dotación para tipo rural y su rango recomendado por el ICAA 150 – 250 litros por persona al día, se aproxima prácticamente al doble de este rango sugerido. Por otra parte, se estima el caudal medio diario (Qmd), caudal máximo diario (QMD) y caudal máximo horario (QMH) proyectados para los años 2040 y 2045, representados en el cuadro 5.12, y a su vez, considerando los valores de pérdidas del cuadro 5.11. con la finalidad de evaluar cuál sería la variación de la cantidad de agua requerida en futuros escenarios.

Cuadro 5.12. Estimación del Qmd, QMD y QMH para los años 2040 y 2045

Población	Qmd (L·s ⁻¹), año 2040				Qmd (L·s ⁻¹), año 2045			
	325	371	406	433	325	371	406	433
Método geométrico	10,19	11,63	12,72	13,57	9,89	11,29	12,36	13,18
Método logarítmico	14,76	16,85	18,44	19,67	15,28	17,45	19,09	20,36
Promedio	12,47	14,24	15,58	16,62	12,59	14,37	15,73	16,77
Población	QMD (L·s ⁻¹), año 2040				QMD (L·s ⁻¹), año 2045			
	325	371	406	433	325	371	406	433
Método geométrico	12,22	13,95	15,27	16,28	11,87	13,55	14,83	15,82
Método logarítmico	17,71	20,22	22,13	23,60	18,34	20,94	22,91	24,44
Promedio	14,97	17,09	18,70	19,94	15,11	17,24	18,87	20,13
Población	QMH (L·s ⁻¹), año 2040				QMH (L·s ⁻¹), año 2045			
	325	371	406	433	325	371	406	433
Método geométrico	19,56	22,33	24,43	26,06	18,99	21,68	23,73	25,31
Método logarítmico	28,34	32,36	35,41	37,76	29,35	33,50	36,66	39,10
Promedio	23,95	27,34	29,92	31,91	24,17	27,59	30,19	32,20

Para efectos de diseño, se pretende utilizar como valor de caudal medio diario (Qmd) el valor de 16,77 L·s⁻¹ para el año 2045, que corresponde con un 25% de pérdidas. Con respecto

al valor de caudal máximo diario (QMD), para cumplir con los requerimientos de agua para los años 2040 y 2045, el acueducto rural de Santa Cruz de Turrialba deberá contar con al menos $20,13 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ para prestar el servicio a sus usuarios, considerando el crecimiento poblacional y también, el porcentaje de pérdidas del 25%. Por último, el valor de caudal máximo horario corresponde a $32,20 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$. Sin embargo, todos estos valores de caudal requerido pueden reducirse hasta en un 25% si no se consideran las pérdidas del recurso hídrico. Además, se hace necesario mencionar que estos son valores relativamente elevados según las dotaciones que se recomiendan a nivel nacional, situación que se debe en gran medida a que la muestra contemplada para las estimaciones tomó a los usuarios que actualmente se dedican a labores como el pastoreo de ganado para la producción de leche. Siendo estos los responsables de un consumo por encima del que se espera para abonados que dedican sus actividades a un uso domiciliario únicamente.

De la información obtenida en el apartado de oferta del recurso hídrico, cuadro 5.4. el acueducto rural de Santa Cruz tiene una oferta del recurso hídrico de hasta $41,49 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ considerando el promedio de los resultados de aforos de los últimos 4 años. Además, en términos de calidad del recurso hídrico y su cumplimiento con la normativa vigente es importante mencionar que es la naciente El Tírra la que presenta los parámetros de calidad más acordes con lo estipulado por el reglamento para la calidad del agua potable en Costa Rica, seguido de esta, se encuentran las nacientes Caragra y La Quebrada. Es decir, se pueden sumar los caudales promedios de las nacientes El Tírra con $12,62 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ y Caragra con $10,22 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$, y así, el acueducto rural de Santa Cruz tendría suficiente agua para cumplir con el valor de caudal máximo diario (QMD) obteniendo un caudal de $22,84 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ el cual sería suficiente para atender la demanda requerida para el año 2045 que según cálculos fue de $20,13 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ (ver cuadro 4.10.)

Para efectos del trabajo de laboratorio del presente estudio no se optó por la mezcla de las captaciones con condiciones más favorables (El Tírra y Caragra). En este caso, se realizó una mezcla de las fuentes Caragra y La Quebrada, debido a que los contaminantes de interés presentes en sus aguas exceden los límites permisibles, hecho que motiva a plantear una posible alternativa para aguas con alto grado de contaminación de estas sustancias tales como las que emplea el acueducto de Santa Cruz, así como los demás entes que se abastecen de estas aguas y que presentan similitudes en el comportamiento de la calidad del recurso.

5.4 SELECCIÓN DE TECNOLOGÍA DE TRATAMIENTO

Como se mencionó anteriormente, el estudio de las alternativas de tratamiento se realizó para determinar que tecnologías permiten adecuar las nacientes “Caragra” y “La Quebrada”, de manera que se dé una reducción en los valores de DT y SO_4^{2-} , esto para que haya un cumplimiento con la normativa vigente y se reduzcan los posibles efectos negativos que pueda tener sobre la población abastecida. Como resultado de la revisión de alternativas para la reducción de sulfatos y dureza total en aguas, (ver cuadros 3.2 y 3.5) se tiene la información del cuadro 5.13 en el que se consideran cuales tecnologías aplican para la reducción de las concentraciones de iones calcio, magnesio o sulfato.

Cuadro 5.13. Capacidad de las tecnologías para la reducción de contaminantes en agua para consumo humano.

Tecnología	Remueve	
	Sulfatos	Dureza
Ablandamiento con cal	No	Si
Resinas de intercambio iónico	Si	Si
Nanofiltración por membrana	Si	Si
Osmosis inversa	Si	Si

Basado en la sección 3.3.1 el ablandamiento de agua se puede diseñar, considerando un proceso de precipitación basado en la adición de un compuesto que genere las condiciones en el sistema y se dé la formación de un componente insoluble (precipitado) que puede ser removido posteriormente por métodos físicos. Para esto, como ya fue mencionado en la sección 4.4.3 y 4.4.4 el tratamiento consistió en la adición de cal a un número determinado de muestras de agua cruda obtenida directamente de las nacientes de interés. Sumado a estas pruebas se consideró la adición de hipoclorito de calcio a estos ensayos. Debido a que fueron observados en análisis de laboratorio previos, como la concentración de calcio y magnesio principalmente, tendían a disminuir cuando se observaban los resultados de los análisis de las nacientes con respecto al tanque de almacenamiento una vez que había sido clorada el agua.

5.4.1 Ablandamiento del agua por precipitación

Para este experimento, tal y como se describió en la sección 4.3.2.3. se realizaron 4 ensayos, el primero de ellos, consistió en la adición de hipoclorito de calcio, el segundo evaluó la capacidad de la cal comercial, seguida de un periodo de sedimentación, como tercera alternativa, similar al tratamiento 2, con una etapa adicional en la que se añadió hipoclorito de calcio, y por último, el cuarto tratamiento tomó una fracción del tratamiento 2 al cual se le aplicó la dosis de cloro requerido. Estas pruebas permitieron evaluar la capacidad del hipoclorito de calcio y cal comercial como alternativa para la remoción de la dureza y sus posibles efectos en la concentración del ion sulfato. Estos resultados se agrupan y se muestran en el cuadro 5.14.

Cuadro 5.14. Resultados de la evaluación de cal comercial para la remoción de dureza total y sulfatos del agua que abastece el Acueducto Rural de Santa Cruz de Turrialba.

Tratamiento	Tiempo de retención (minutos)	Calcio mg·L ⁻¹ (Ca ²⁺)	Magnesio mg·L ⁻¹ (Mg ²⁺)	Dureza Total mg·L ⁻¹ (DT)	Sulfatos mg·L ⁻¹ (SO ₄ ²⁻)	pH
Agua cruda	-	81±3	63±4	462 ±5	344 ±34	6
1	30	71 ± 4	24 ± 2	276 ± 4	320 ± 32	6,79
2	55	209 ± 10	0,08 ± 0,03	522 ± 10	318 ± 31	11,88
3	85	197 ± 9	0,10 ± 0,03	492 ± 9	314 ± 31	11,14
4	85	91 ± 4	12 ± 1	277 ± 4	309 ± 31	10,54

*

Del cuadro 5.14 se observa como el primer tratamiento tiende a reducir los valores de todas las sustancias que se están dando seguimiento en esta investigación, específicamente, para el tratamiento 1 el calcio presenta una reducción del 12,35% , para el magnesio la reducción se logra en un 61,90%, comparativamente es menor a los restantes tratamientos pues estos alcanzan un 99,87%, 99,84% y un 80,95% para los tratamientos 2, 3 y 4 respectivamente. Estas 2 sustancias permiten que la dureza total muestre una reducción cercana al 40,00% para los tratamientos 1 y 4, no así para los tratamientos 2 y 3 que tienden a aumentar.

Por último, se evaluó la concentración del ion sulfato, este disminuyó en los cuatro tratamientos, los porcentajes respectivos para cada tratamiento fueron del 6,98, 7,56, 8,72 y 10,17. Adicionalmente, se dio un seguimiento al comportamiento del pH para los 4 ensayos

efectuados. Como se observa del cuadro 5.16. el tratamiento 1 permite que el agua que puede ser utilizada para el abastecimiento a la población se encuentre en cumplimiento con la normativa vigente para calidad de agua potable. Los restantes tratamientos por su parte demandarían la necesidad de un proceso que regule este parámetro debido a sus valores elevados, producto de la adición de hidróxido de calcio disponible en la cal comercial estudiada.

5.4.2 Unidad de intercambio aniónico para la remoción de sulfato en agua

Haciendo un análisis de cuál es la combinación de tecnologías que se puede emplear, se determinó que las resinas de intercambio aniónico permiten remover concentraciones de sulfatos en aguas con excelentes rendimientos tal y como se ha descrito en la sección 3.4. además que comercialmente, la oferta en el mercado es amplia, así como la revisión literaria que muestra como es un tema ampliamente estudiado, hecho que permite seleccionar la tecnología y predecir resultados favorables.

5.4.2.1 Elección de la resina

Con la información recopilada en el proceso de la revisión literaria, así como también, la revisión de resinas de intercambio aniónico, que actualmente se ofrecen en el mercado, fueron identificadas una serie de resinas, que la literatura ha identificado con especial capacidad para la remoción del contaminante sulfato.

- Amberlite® IRA-400(Cl),
- Dowex 21K,
- Amberlite® IRA 910,
- Dowex Marathon 11.

De estas, se seleccionó la Amberlite® IRA 910 debido a que comparativamente con otras resinas disponibles (ver información de apéndice 7), se mostraba una mejor relación de

cantidad/precio, también, se reporta una mayor eficiencia de este material para la reducción de iones sulfatos en aguas debido a la afinidad que posee este material con dicho compuesto.

5.4.2.2 Curva de ruptura (BTC)

La resina fue seleccionada basada en los resultados obtenidos en la revisión de literatura, principalmente, se consideró su costo económico por unidad de masa y la eficiencia que se reportaba para la retención del ion sulfato. La capacidad de intercambio de iones está relacionada con la cantidad de grupos funcionales que tengan las resinas, esto se expresa en el número de equivalentes totales disponible por unidad de volumen de resina, de manera que, alcanzado este valor, la resina perderá su capacidad para realizar la retención del contaminante.

Es común, que el comportamiento de adsorción de una resina de intercambio sea expresado en términos de la concentración del contaminante como su relación en este caso de la concentración del sulfato en el efluente con respecto a la concentración a la entrada de la columna ($C \cdot C_0^{-1}$) en función del tiempo o del volumen del efluente para una altura de lecho dada (García, Solache, Alarcón, & Martínez, 2014). Como tal, se observa en la figura 5.8. y 5.9. que, aplicando los valores teóricos para la saturación del lecho humedecido, que fueron considerados a partir de los datos del fabricante, se observa el comportamiento deseado con respecto al valor de ruptura cercano a los 800 mL en el que se alcanza la capacidad de intercambio máxima reportada ($1 \text{ meq} \cdot \text{mL}^{-1}$), a partir de este punto, el volumen de líquido analizado en el efluente refleja una concentración de sulfato que se aproxima a la concentración del contaminante inicial ($C \cdot C_0^{-1} \sim 1$) hecho que indica que la resina ha retenido la capacidad esperada y posterior a esto su eficiencia decae pues las concentraciones inicial y final tienden a mostrarse similares.

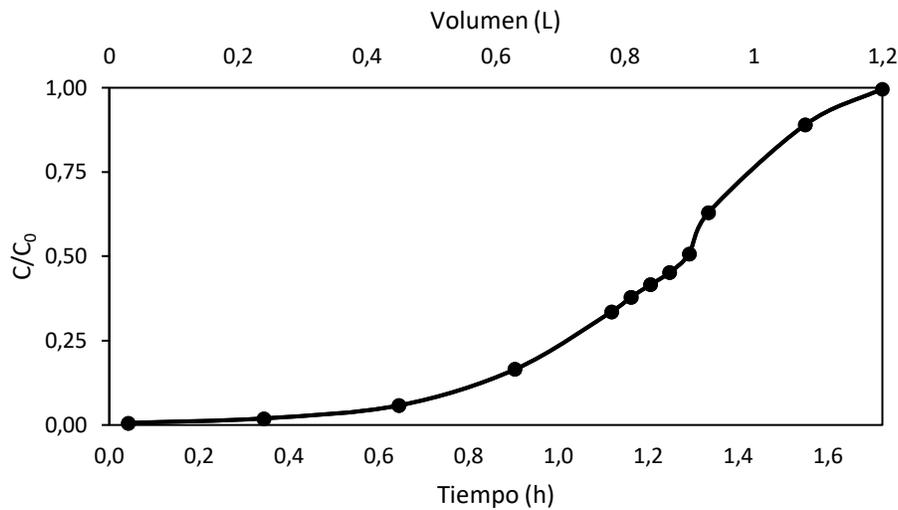


Figura 5.8. Curva de ruptura de la resina Amberlite® IRA 910 para la retención del ion sulfato.

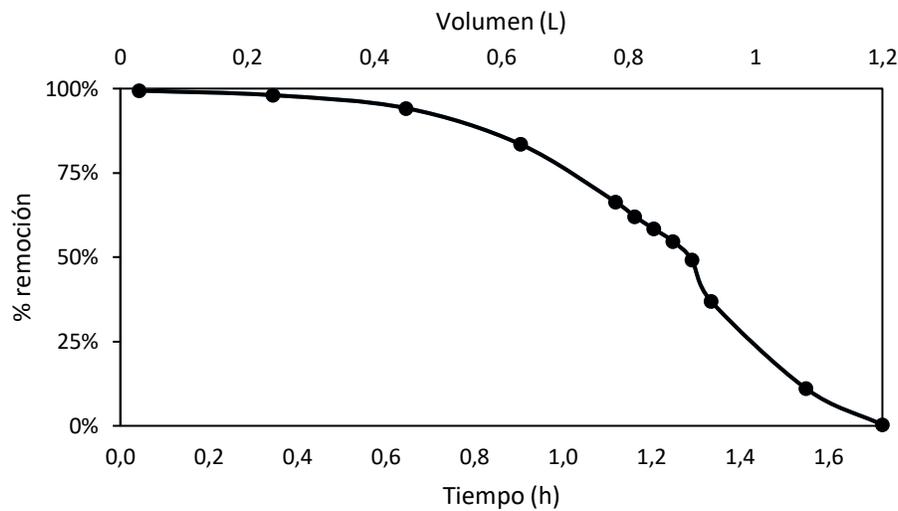


Figura 5.9. Eficiencia de remoción del ion sulfato por parte de la resina Amberlite® IRA 910

En el caso de la figura 5.9. fue construida considerando que cercana al valor de los 809 mL el sistema que contaba con los 5 mL de resina humedecida alcanzaba el punto de equivalencia con respecto a la carga del contaminante presente en el agua de alimentación y la capacidad de retención del SO_4^{2-} por parte de la resina. Entonces, se puede considerar que el uso a nivel de tratamiento de esta resina no puede sobrepasar este valor debido a que la capacidad de retener el ion de interés se ve limitada. Como complemento, se observa que en

la figura 5.10. la capacidad de retener el contaminante bajo las condiciones del estudio fue superior al 80% para un volumen de agua mayor a la mitad del que fue empleado para el ensayo. También, se puede afirmar observando este gráfico que la eficiencia de remoción del 50% ocurre cuando han transcurrido 900 mL de agua y no se considera conveniente sobrepasar este punto pues el cambio en la pendiente de la curva indica que la tasa a la que decae la eficiencia de retención del contaminante es más rápida que en los puntos de análisis anteriores. Con respecto a la fracción de muestra del experimento, su análisis mostró una concentración del ion sulfato de $166 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ por lo tanto se cumple con el objetivo de tener un agua con un parámetro acorde a lo estipulado en el reglamento para la calidad del agua potable de Costa Rica, cuyo valor máximo permisible se tiene en $250 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ a la vez que se mantiene un rango de operación aceptable para la resina.

De acuerdo con García, Solache, Alarcón, & Martínez (2014) La cantidad de contaminante que puede ser retenido en una columna de intercambio a partir de una concentración inicial y un caudal constante se puede obtener de la ecuación 5.1

$$C_r = \frac{Q_e \cdot t_r \cdot C_0}{m_c} \quad (\text{ec 5.1})$$

En donde C_r representa en ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$) la capacidad de retener el contaminante de interés en el punto de quiebre, Q_e corresponde al flujo ($\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$) en el efluente, t_r corresponde al tiempo de servicio (min) obtenido cuando se alcanza el $C/C_0 = 0,5$ y m_c es la masa de resina (g) en la columna. El valor obtenido para este parámetro fue de $84,17 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$. Según esta información, para realizar un tratamiento considerando las condiciones de operación que requiere el acueducto, al tratar un flujo de agua de $9 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$ se tendría que hacer frente una carga de sulfato de $125 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1}$ y, por lo tanto, serían requeridos 1.485 kg de resina durante una jornada de operación continua de 24 horas.

5.4.2.3 Modelación de curva de ruptura

Con el propósito de mostrar los datos experimentales de manera que se pueda predecir su comportamiento en etapas posteriores de diseño de plantas piloto o un diseño a escala de comunidad, se toman estos datos y se ajustan a modelos empíricos que han sido desarrollados previamente por otros investigadores, de manera que se puedan conocer cuáles son los

parámetros/ coeficientes que describen el proceso de intercambio iónico entre la resina seleccionada y el agua real que se pretende tratar para abasto de la población. Para, el caso de estos 4 modelos, en el cuadro 5.15. se define el significado de sus variables, su unidad de medida, así como el resultado obtenido para cada uno de sus parámetros.

Cuadro 5.15. Resultados de aplicación de 4 modelos experimentales para la prueba de intercambio iónico de la resina Amberlite® IRA 910

Parámetros según modelo	Valor
Datos generales	
Flujo, Q (L·h ⁻¹)	0,6840
Masa, m (g)	3,4927
Volumen de resina empacada (mL)	5,0
Altura del lecho humedecido, H (cm)	5,0
Concentración inicial contaminante, C ₀ (mmol · L ⁻¹)	3,4027
Thomas	
Constante del modelo, k _T (L·mmol ⁻¹ ·h ⁻¹)	1,1900
Capacidad de adsorción, q (mmol·g ⁻¹)	0,8772
Coefficiente de correlación, R ²	0,9892
Bohart-Adams	
Constante cinética del modelo, k _{B-A} (L·mmol ⁻¹ ·h ⁻¹)	1,0638
Capacidad de remoción, q _{B-A} (mmol · L ⁻¹)	718,480
Coefficiente de correlación, R ²	0,8259
Yoon-Nelson	
Constante del modelo, K _{YN} (h ⁻¹)	4.1248
Tiempo cuando C·C ₀ ⁻¹ = 0,5; τ (h)	1.2922
Coefficiente de correlación, R ²	0,8483
Wolborska	
Coefficiente cinético de la transferencia de masa externa, β _a (h ⁻¹)	725.7257
Capacidad de remoción, q (mmol · L ⁻¹)	765.976
Coefficiente de correlación, R ²	0,8445

En los procesos de adsorción de contaminantes resulta primordial conocer la naturaleza del agua y la presencia de iones coexistentes en el medio. Estos son factores que permiten conocer la capacidad de adsorción que son reflejados en los estudios de columnas y de esta manera se puede realizar una aproximación a las condiciones de una puesta en marcha a nivel de campo. (García, Solache, Alarcón, & Martínez, 2014). El ensayo de la curva de ruptura fue planteado para observar el comportamiento de la resina mientras esta se satura con el ion

sulfato contenido en el agua a tratar. Por otra parte, en la sección 3.2.2.2 se describió el modelo de Thomas y cómo este se utiliza para diseñar la máxima capacidad que tiene la resina para retener el contaminante de interés. De esta manera, se considera como el modelo más apropiado debido a que permite predecir un mejor comportamiento del sistema en términos de la capacidad de adsorción de la resina Amberlite® IRA 910 con respecto al ion sulfato. Este comportamiento se observa gráficamente en la figura 5.10, Además, según la información del cuadro 4.15., el modelo de Thomas es el que presenta un mejor ajuste a los datos obtenidos experimentalmente corresponde a con un coeficiente de correlación R^2 de 0,9892. Según este modelo se obtuvo que posee una capacidad de intercambio de 84,30 mg de sulfato por cada gramo de resina. Basado en esta relación es posible afirmar que, a partir de un gramo de resina, se podría realizar el tratamiento de un litro de agua contaminada con $327 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de sulfato y se obtendría un resultado que estaría por debajo del límite admisible por la reglamentación vigente.

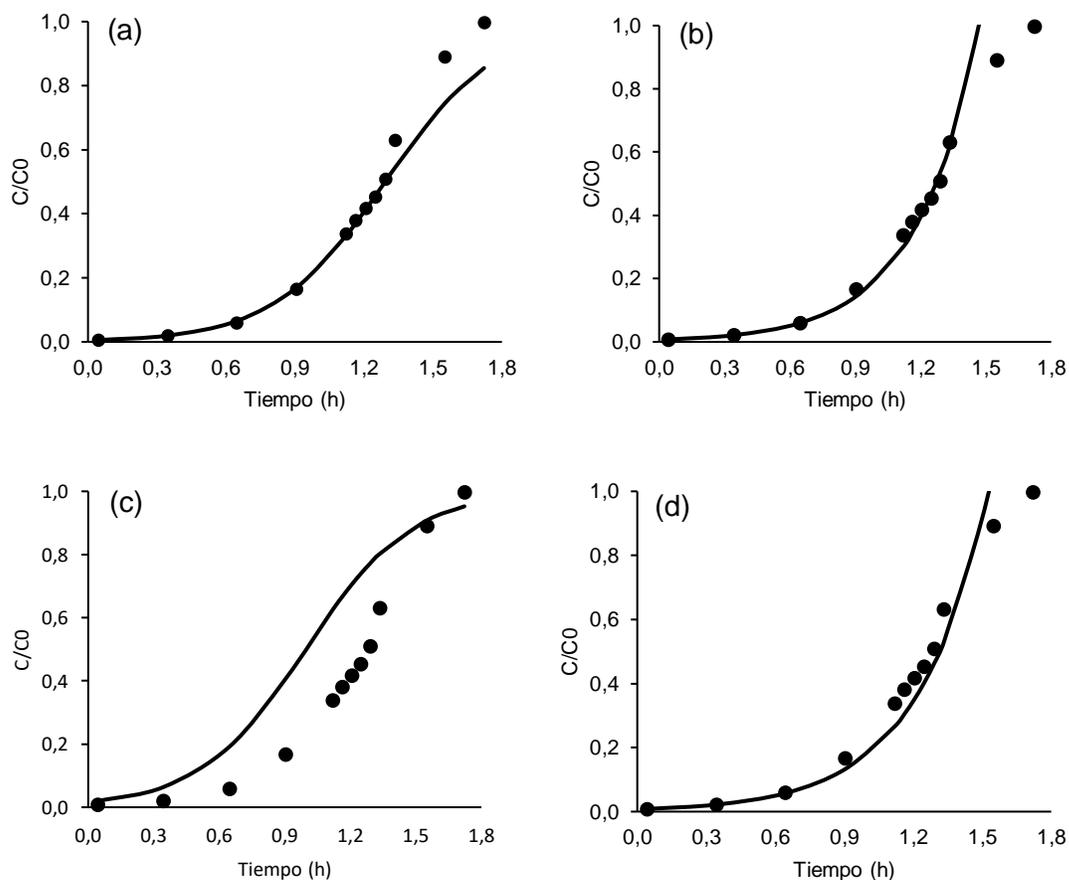


Figura 5.10. Comparación de puntos experimentales y curvas de ruptura calculadas por (a) modelo de Thomas (b) modelo de Bohart Adams (c) modelo de Yoon- Nelson y (d) modelo de Wolborska.

5.5 SISTEMA PARA LA POTABILIZACIÓN DE AGUA

5.5.1 Sistema de tratamiento actual

5.5.1.1 *Tanque de reunión de aguas*

El acueducto rural de la ASADA Santa Cruz de Turrialba cuenta con 4 fuentes de agua captadas además de sus respectivas líneas de conducción hasta el tanque de reunión, estructura que se encuentra en malas condiciones, fueron visibles grietas, pérdidas de agua a través de las grietas, paredes internas y externas desgastadas y carentes de revestimiento, el borde en concreto a su alrededor es menor a un metro y una de sus caras laterales se encuentra en contacto con el terreno de la zona debido a la ubicación geográfica en la que se ubica, se observaron sedimentos en lo interno del tanque y no se cuenta con un plan para su reparación o al menos para efectuar lavados periódicamente, no se cuenta con una cerca de protección en el perímetro y tampoco con un sistema de cierre seguro para la tapa. Este tanque tiene dimensiones internas de 2,65 metros de largo, 1,85 metros de ancho y 1,30 metros de altura del nivel de rebalse, por lo tanto, su capacidad útil para contener agua es de 6,37 metros cúbicos.

Debido al sitio donde se ubica este tanque se dificulta obtener una fotografía que lo permita ver en su totalidad, no obstante, en la figura 5.11 se puede apreciar parte de la infraestructura del tanque desde la parte superior del mismo. Por último, no se conoce en detalle la fecha de su construcción y ha quedado en evidencia que el mantenimiento a esta infraestructura no es el adecuado, además, el volumen que recibía y se constató durante las visitas de campo era en promedio 41,49 litros por segundo según el caudal generado por las nacientes y descrito anteriormente, esto implica que el tiempo de retención hidráulico sea de aproximadamente 2,56 minutos, caudal que es relativamente alto si se compara con el volumen de la infraestructura y que ha quedado en evidencia debido al continuo rebalse. A este punto, es necesario considerar la posibilidad de suspender el uso de este tanque y realizar las gestiones necesarias para instalar una infraestructura acorde a los requerimientos de este tipo de unidades.

5.5.1.2 Desinfección

Durante el primer trimestre del año 2018 se decidió por parte de la ASADA colocar el sistema de cloración en el tanque de reunión descrito en el numeral 5.5.1.1 y como se aprecia en la figura 5.11. esta decisión fue tomada considerando que existía un sector de la población abastecida ubicada en un tramo comprendido entre el tanque de reunión y el tanque de almacenamiento “Patal” (donde anteriormente se tenía instalado el sistema de cloración) que estaba recibiendo agua sin la debida desinfección. No obstante, el cambio implicó la elaboración de un clorador artesanal, elaborado por los propios fontaneros de la ASADA, dejando de lado el que ya habían adquirido y se tenía en uso en el tanque “Patal”, este sistema carece de un medidor de caudal que permita regular la dosis de cloro aplicado, no existe un protocolo establecido para la medición rutinaria del cloro residual libre, no se contaba al momento de esta investigación con registros de estos datos y por ende no se tiene una forma de evaluar la eficiencia del proceso. Si se constató que la colocación del sitio de cloración se basó en el hecho de distribuir a sus abonados un producto que hubiese sido previamente desinfectado, pero, no se tuvo consideración técnica alguna para la selección del sitio de cloración, pues, aparte del mal estado de la estructura, se observó como el sistema de cloración fue colocado cercano a la tubería de rebalse del tanque de reunión, cabe decir que fue visible el rebalse de este tanque durante todas las visitas que se realizaron a la zona y por ende es asumible las pérdidas de la disolución concentrada de cloro por esta tubería.

Las condiciones anteriores de infraestructura del tanque de reunión de aguas y su diseño, así como el sistema dosificador de cloro, su ubicación y diseño no son los adecuados. No se está dando el tiempo de contacto de cloro adecuado que permita una correcta desinfección del agua que se abastece a los usuarios. Por lo tanto, este mal manejo requiere la atención inmediata por parte del Acueducto de manera tal que se pueda optimizar la aplicación del desinfectante y se aseguren niveles de cloro residual acordes a lo estipulado en la legislación actual.



Figura 5.11. Sistema de cloración en tanque de reunión de aguas

5.5.1.3 Tanque de almacenamiento

A través de la tubería de conducción el agua que ha sido clorada previamente llega al tanque de almacenamiento “Patal”, el cual, mediante mediciones internas de su estructura se obtuvo que la medida en metros de sus componentes es la siguiente: largo 8,81, ancho 8,40 y altura del rebalse 2,00. Por lo tanto, el volumen útil para almacenar agua corresponde a 148,01 metros cúbicos. Partiendo del tanque de reunión de aguas, no se conoce el dato de pérdidas de agua en él, esto debido a que no existen las condiciones para realizar mediciones del caudal en el rebalse de esta infraestructura, también, existen conexiones de agua a usuarios del servicio entre el tramo comprendido entre el tanque de reunión y el tanque “Patal” y se desconoce su consumo, además, en este mismo tramo existe una desviación en la línea de conducción que lleva agua a un sector del sector de Santa Cruz denominado Calle Leiva, en donde se encuentran dos tanques de almacenamiento para la distribución de agua de este barrio.

A estas situaciones desfavorables se le añade la inexistencia de macro medición a las entradas o salidas de las estructuras hidráulicas que provocan que no exista de momento una alternativa para estimar al menos el caudal que sale del tanque “Patal” y por ende no se tengan datos como el tiempo de retención. Cabe señalar que este tanque se encuentra ubicado

contiguo a un sitio dedicado al pastoreo de vacas, en el que la malla de protección se apreciaba defectuosa, a lo interno del tanque se observó la presencia de sedimentos, y como se mencionó previamente, el sistema de cloración en este sitio se encuentra fuera de operación debido a que actualmente se trasladó la desinfección al tanque de reunión. Tales situaciones requieren la intervención por parte del acueducto para así asegurar la calidad del recurso hídrico.

5.5.2 Propuesta de sistema de tratamiento

Basado en las condiciones actuales de infraestructura que incluye las captaciones, tanque de reunión, líneas de conducción y el tanque de almacenamiento “Patal”. Considerando además la calidad y disponibilidad del recurso hídrico que se tiene en relación a la demanda actual y futura de agua potable para los usuarios del servicio es necesaria realizar una intervención de manera tal que se puedan corregir asuntos relacionados con el diseño de la infraestructura y su mantenimiento y principalmente con la calidad del recurso hídrico del que dispone la población se considera en la figura 5.12 el sistema propuesto para el tratamiento del agua que será destinada a las comunidades atendidas por esta ASADA.

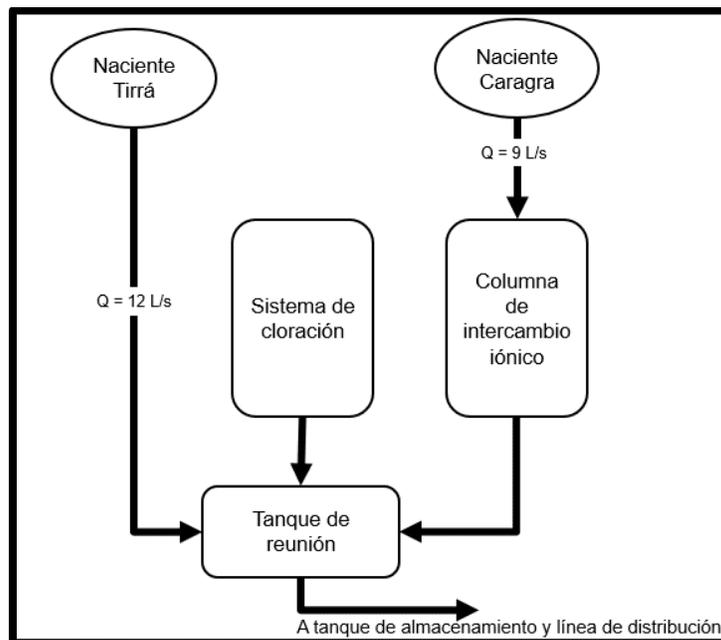


Figura 5.12. Esquema de tratamiento de aguas propuesto para el abastecimiento de agua por parte del Acueducto Rural de Santa Cruz de Turrialba

5.5.2.1 Parámetros de diseño del proceso para columnas de lecho fijo

Este proyecto de investigación permitió identificar una alternativa que requiere mayor seguimiento para una eventual puesta en marcha a nivel comunal. Siendo así, para el diseño de un sistema de tratamiento de aguas contaminadas con compuestos inorgánicos, como es el caso del sulfato, mediante el uso de una resina de intercambio iónico, según (AWWA, 2011) se deben llevar a cabo las siguientes etapas que permitan validar la capacidad de este sistema de tratamiento como alternativa real.

1. Seleccionar una resina y un nivel de regeneración usando la literatura del fabricante de la resina.
2. Calcular la fracción permitida de agua que atravesará el lecho de la resina.
3. Elegir la velocidad de flujo de servicio (SFR, EBCT).
4. Calcular la longitud del recorrido y los volúmenes de lecho que pueden ser tratados antes del punto de quiebre (breakthrough).
5. Calcular el volumen de resina requerido.
6. Determinar el tiempo mínimo fuera de servicio (en horas) durante la regeneración de la resina.
7. Elegir la cantidad de columnas en el sistema.
8. Dimensionar las columnas.
9. Calcular el volumen y la composición de las aguas residuales.

El diseño de columnas de intercambio iónico involucra la determinación del volumen de la resina, el área de superficie de resina requerida, el número de columnas, altura lateral y la caída de presión propia del sistema. De acuerdo con (AWWA, 2011), existen un conjunto de recomendaciones para el tamaño del lecho y velocidades de flujo

- Profundidad: mínimo 0,76 m y máximo 3,70 m
- Tiempo de contacto del filtro vacío (EBCT): 1,5 – 7,0 minutos. Esto determina el volumen de la resina.

- Tasa de flujo de servicio (SFR) corresponde a la tasa de agotamiento. Este se encuentra en un rango de (8 – 40 BV/h)
- La fórmula para obtener el EBCT = V_R/Q_F (tiempo promedio de detención de agua en una cama vacía)
- El $SFR = 1 / EBCT = Q_F/V_R$

Donde:

El Q_F es el caudal volumétrico del agua de alimentación y está dado en L/min

El V_R corresponde al volumen de la resina, incluyendo vacíos, se expresa en m^3 (ft^3)

Los sistemas empleados hoy en día muestran que las resinas son empacadas en recipientes de acero, esto permite generar una serie de condiciones favorables:

- Buen sistema de alimentación y buen sistema de distribución de regenerante.
- Buen soporte, incluye disposición para el agua de distribución de retrolavado.
- Suficiente espacio libre sobre/encima del lecho de resina para cualquier expansión durante el retrolavado.
- Es importante que el recipiente deba resistir las soluciones usadas para limpiar la resina.

Además, con respecto al proceso de regeneración en paralelo y en contracorriente, llevados a cabo como una etapa normal del funcionamiento de los intercambiadores iónicos, son necesarias las pruebas previo a una instalación a nivel comunal. Ambos casos son válidos. Por un lado, el agotamiento de flujo descendente seguido de regeneración en paralelo de flujo descendente han sido el modo usual para la operación de las resinas de intercambio iónico. Mientras que, el flujo ascendente (contracorriente) se usa con el fin de minimizar la fuga de iones contaminantes en las siguientes puestas en marcha del intercambiador iónico, esto porque la parte inferior del lecho queda regenerada.

Todas estas acciones, deben contemplarse en proyectos a nivel de laboratorio o a nivel piloto en el campo previo a una eventual puesta en marcha en sistemas comunitarios. Sin embargo, no se atienden en la presente investigación debido a limitaciones de tipo económicas y de tiempo. Por esto, se plantea la posibilidad de ser considerado como un futuro

proyecto de investigación, que dé un seguimiento al actual trabajo y se procedan a considerar múltiples ensayos bajo las mejores condiciones de operación posibles, de manera tal que exista en el país las capacidades para llevar a cabo este tipo de tecnologías de tratamiento de agua de ser requeridas.

5.5.2.2 *Tanque de almacenamiento*

Para el diseño de esta estructura se debe al menos tener la capacidad para compensar las fluctuaciones horarias de la demanda, también, deben tener la capacidad para combatir incendios y, además, deberá considerar un volumen para interrupciones, por lo tanto, el volumen del tanque corresponderá al mayor de los valores obtenidos del cálculo de los volúmenes para regulación de consumo, reserva para incendios y reserva por interrupciones.

En el cuadro 5.16 se muestra el resultado de las estimaciones de los volúmenes del tanque de almacenamiento para el periodo de diseño propuesto de 25 años.

Cuadro 5.16. Cálculo de los volúmenes de almacenamiento

Capacidad de almacenaje	Volumen (m ³)
Regulación de consumo	522
Contra incendios	144
Reserva	290

Con la determinación de estos volúmenes se observa como el acueducto requiere de un tanque de almacenamiento de 522 m³ de manera que se cubran los requerimientos de la población en el año 2045. Para efectos de construcción de esta estructura se pueden hacer consideraciones como por ejemplo separar el volumen en al menos 2 o más tanques para que permita mantener al menos un tanque en funcionamiento durante los periodos de mantenimiento, limpieza, reparaciones o fugas. También, se deben definir aspectos como la posición del tanque (elevado, superficial, enterrado o semienterrado) y considerar el material de construcción como lo pueden ser el concreto, plástico o metal.

6. CONCLUSIONES

La oferta promedio de agua según estimaciones con datos de los aforos de los últimos 4 años indican que se cuenta con $41,49 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ de los cuales, $12,62 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ corresponden al caudal producido por la naciente “El Tirrá”, $10,22 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ para la naciente “Caragra”, $5,90 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ son generados por la naciente “La Quebrada” y los restantes $12,75 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ los aporta la naciente “El Cedro”

Con respecto a la calidad del recurso hídrico ofertado, la captación “El Tirrá” cumple con los parámetros admisibles estipulados en el reglamento para la calidad del agua potable en Costa Rica. Las nacientes “Caragra” y “La Quebrada” presentan valores de calidad del agua que incumplen la normativa. La naciente “El Cedro” es la naciente con el peor escenario con respecto a las anteriores.

La demanda de agua actual para las comunidades abastecidas se estima en 302 ± 50 litros por persona al día, para efectos de diseño se asume un valor de $325 \text{ L/persona}\cdot\text{día}$ y considerando pérdidas de hasta un 25 % el valor resultante puede ascender hasta los $433 \text{ L/persona}\cdot\text{día}$. Se requiere de un caudal máximo diario (QMD) de $20,13 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ para el año 2045 considerando el crecimiento poblacional y pérdidas de agua de hasta un 25%.

El hipoclorito de calcio, utilizado como agente para la desinfección del agua, muestra una capacidad de reducir la concentración del calcio en un 12,35%, el magnesio disminuye en un 61,90% y en el caso del sulfato un 6,98%. La cal comercial utilizada, incrementó la concentración de calcio en disolución (caso desfavorable), no obstante, para la remoción de magnesio presentó eficiencias de hasta 99 %.

A partir de los datos obtenidos de la curva de ruptura de la resina, así como de los modelos experimentales empleados para la retención del ion sulfato, el sistema tuvo la capacidad de retener $84,30 \text{ mg}$ de sulfato por cada gramo de resina. Se demuestra la capacidad del sistema para tratar el agua y obtener una concentración de sulfato en el efluente aceptable con lo estipulado en la normativa vigente.

7. RECOMENDACIONES

El hipoclorito de calcio utilizado como agente desinfectante muestra un comportamiento especial, pues regula hacia la baja la concentración de contaminantes como el calcio, magnesio y sulfato. Por ende, se recomienda estudiar el mecanismo que ocurre y que genera esta situación. Para este estudio, demostró ser capaz de ajustar los parámetros de calidad de agua acordes a la normatividad.

Para la prueba de ablandamiento con cal se deben realizar los ajustes necesarios para una posible implementación a nivel de laboratorio. Para esta investigación se desestimó como alternativa viable. Pese a reportarse valores de remoción de hasta un 99% de magnesio

Considerando los parámetros favorables de calidad del agua de la naciente “El Tirrá” es posible su aprovechamiento sin la necesidad de tratamiento alguno. Por tal motivo, sería necesario diseñar una planta de tratamiento de al menos 9 L/s para ajustar los requerimientos de caudal para el año 2045. Siendo así, se sugiere aprovechar el caudal de la naciente “Caragra” y eventualmente la naciente la quebrada para ser tratadas

Se deben realizar más pruebas a nivel de laboratorio utilizando la resina de intercambio iónico para evaluar su aplicación bajo diferentes condiciones de operación, de manera que se pueda predecir su comportamiento en proyectos futuros de escala comunal.

8. REFERENCIAS

- Handbook of Environmental Engineering Calculations, Second Edition* 2007 McGraw-Hill Education
- A REVIEW OF SULFATE REMOVAL OPTIONS FOR MINE WATERS* s.f
- Acceso a agua para consumo humano y saneamiento. Evolución en el periodo 1990-2010 en Costa Rica* 2011
- Actualización de los criterios de calidad del agua de pozos y nacientes para potabilización en Costa Rica 2016 *Tecnología en Marcha* 29385-98
- APHA, AWWA & WEF 2012 *Standard Methods for the Examination of Water and Waste Water* Washington D.C American Public Health Association
- Application of mathematical empirical models to dynamic rem natural zeolite clinoptilolite in a fixed bed column 2011 *Indian Journal of Chemical Technology* 123-131
- AWWA & ASCE 2012 *Water Treatment Plant Design, Fifth Edition. MASTER PLANNING AND TREATMENT PROCESS* McGraw-Hill Professional
- AWWA 2011 *Water Quality & Treatment: A Handbook on Drinking Water, Sixth Edition* McGraw-Hill Professional
- AWWA 2011 *Water Quality & Treatment: A Handbook on Drinking Water, Sixth Edition* McGraw-Hill Professional
- AWWA 2012 *Water Treatment Plant Design, Fifth Edition. MASTER PLANNING AND TREATMENT PROCESS* McGraw-Hill Professional
- Control de calidad en aguas para consumo humano en la región occidental de Costa Rica 2016 *Tecnología en Marcha* 3-14
- Decreto N° 41499-S Reforma y adición al decreto ejecutivo No.38924-S del 12 de enero de 2015 "Reglamento para la calidad del agua potable"
- Decreto N° 38924-S Reglamento para la Calidad del Agua Potable Costa Rica
- Determinación de nitritos, nitratos, sulfatos y fosfatos en agua potable como indicadores de contaminación ocasionada por el hombre, en dos cantones de Alajuela (Costa Rica) 2017 *Tecnología en Marcha* 15-27
- Diseño de un plan de contingencia para el acueducto rural "acuacombia" en el corregimiento Combia Baja, municipio de Pereira departamento de Risaralda*

El agua como parte de la cultura de las comunidades rurales: un análisis para la cuenca del río San Carlos 2015 *Tecnología en Marcha* 126-140

Evaluación de la oferta y demanda del recurso hídrico: propuesta de mejoras para el sistema de acueducto de San Isidro de El Guarco, Cartago, Costa Rica *Proyecto Final de Graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Ambiental* Cartago Costa Rica

2017 *Evaluación y modelado de la aplicación de piedra pómez recubierta de hidróxido de hierro (III) como material adsorbente para sistemas de tratamiento de arsénico de pequeña escala* Cartago Instituto Tecnológico de Costa Rica

Evaluation of groundwater quality in a rural community in North Central of Nigeria 2016 *Environ Monit Asses* 188-192

Food and Agriculture Organization 2012 *Toward the future we want. End hunger and make the transition to sustainable agricultural and food systems*

Gestión de las aguas subterráneas y su aprovechamiento: enfoque específico del sistema empleado para el control legal de la perforación de pozos, en las zonas costeras del cantón de Carrillo, Guanacaste (periodo 1998-2010) 2013 *Tesis de licenciatura, Universidad de Costa Rica*

Global Water Pollution and Human Health 2010 *Annual Review of Environment and Resources* 109-136

Groundwater quality issues and management in Ramganga Sub-Basin *Environmental Earth Sciences* 75121030-1044 doi10.1007/s12665-016-5833-9

Groundwater recharge and agricultural contamination 2002 *Hydrogeology Journal* 10153-179

Groundwaters of Mt. Vulture volcano, southern Italy: Chemistry and sulfur isotope composition of dissolved sulfate 2010 *Geochemical Journal* 44125-135

ICAA 2015 *Memoria Institucional 2014 - 2015*

ICAA *Norma técnica para diseño y construcción de sistemas de bastecimiento de agua potable, de saneamiento y pluvial*

Impact of human activity on groundwater chemistry (Wielkopolska region, Poland) 2016 *Baltica* 29279-92

OMS 2006 *Guías para la calidad del agua potable*

OMS 2011 *Guidlines for drinking-water quality*

*Potabilización del agua. Principios de diseño, control de procesos y laboratorio*2015BogotaUniversidad Piloto de Colombia

*Principles of water treatment*2012John Wiley & Sons

Propuesta para el uso eficiente del agua potable en el Distrito Oriental del Cantón Central de la Provincia de Cartago

2016*Recurso hídrico y saneamiento: avances y desafíos*Costa RicaEstado de la Nación

*Recurso hídrico y saneamiento: avances y desafíos*2016

Removal of fluoride from well water by modified iron oxides in a column system2014*Desalination and Water Treatment*1-9

Selection of magnetic anion exchange resins for the removal of dissolved organic and inorganic matters2012*Journal of Environmental Sciences*24111891-18991

Sources of environmental sulfur in the groundwater system, southern New Zealand2016*Applied Geochemistry*1-16

Sulfate Removal Technologies: A Review

The origin of high sulfate concentrations and hydrochemistry of the upper Miocene-Pliocene-Quaternary aquifer complex of Jifarah Plain, NW Libya2016*Environ Earth Sci*751388

The reorganisation of drinking water quality governance in France. Responsibility-based governance and objective-driven policy setting in question2014*Revue d'Études en Agriculture et Environnement*203-226

Uso y estado de los recursos: recurso hídrico

9. APÉNDICES

APÉNDICE 1. REGISTRO FOTOGRÁFICO DE LAS CAPTACIONES Y SU SITIO DE AFORO.



Figura A.1.1. Captación “Caragra”



Figura A.1.2. Tubería de conducción y tubería aforos “Caragra”



Figura A.1.3. Captación “El Cedro”



Figura A.1.4. Tubería aforo “El Cedro”



Figura A.1.5. Captación “El Tirrá”



Figura A.1.6. Tubería de conducción y línea para aforos “El Tirrá”



Figura A.1.7. Captación “La Quebrada”



Figura A.1.8. Tubería de aforo “La Quebrada”

APÉNDICE 2. REGISTRO DE AFOROS

Cuadro A.2.1. Registro de aforo realizado por la ASADA Santa Cruz de Turrialba

Mes	Caudal (L/s)																			
	Caragra				El Cedro				La Quebrada				El Tirrá				Total			
	2015	2016	2017	2018	2015	2016	2017	2018	2015	2016	2017	2018	2015	2016	2017	2018	2015	2016	2017	2018
Enero	13.30	10.80	7.12	N.R	9.20	12.00	N.R	N.R	3.50	3.50	3.58	N.R	12.00	11.90	11.50	N.R	38.00	38.20	22.20	N.R
Febrero	9.90	9.30	N.R	11.20	12.00	11.60	14.81	14.59	3.60	3.90	N.R	8.61	15.30	12.50	N.R	14.32	40.80	37.30	14.81	48.73
Marzo	8.90	9.60	N.R	14.48	15.00	12.20	N.R	12.21	3.70	3.40	N.R	9.42	15.60	12.10	N.R	13.69	43.50	37.30	N.R	49.80
Abril	9.50	9.50	N.R	9.97	10.50	10.50	N.R	12.98	3.70	3.70	N.R	8.19	11.00	14.70	N.R	10.97	34.70	38.40	N.R	42.10
Mayo	7.40	7.90	N.R	N.R	13.30	11.30	N.R	N.R	3.90	3.90	N.R	N.R	10.50	11.90	N.R	N.R	35.10	35.00	N.R	N.R
Junio	8.00	9.06	N.R	N.R	15.00	10.25	N.R	N.R	3.80	N.R	N.R	N.R	12.50	8.74	N.R	N.R	39.30	28.05	N.R	N.R
Julio	N.R	8.99	N.R	N.R	N.R	11.44	N.R	N.R	N.R	N.R	N.R	N.R	N.R	7.88	N.R	N.R	N.R	28.31	N.R	N.R
Agosto	8.06	9.95	10.36	N.R	13.10	14.39	N.R	N.R	3.40	N.R	7.57	N.R	15.70	8.36	11.62	N.R	40.26	32.70	29.55	N.R
Setiembre	N.R	9.63	N.R	N.R	N.R	10.06	N.R	N.R	N.R	N.R	N.R	N.R	N.R	6.92	N.R	N.R	N.R	26.61	N.R	N.R
Octubre	N.R	14.07	N.R	N.R	N.R	7.76	N.R	N.R	N.R	3.58	N.R	N.R	N.R	11.49	N.R	N.R	N.R	36.90	N.R	N.R
Noviembre	N.R	8.20	N.R	N.R	N.R	18.52	N.R	N.R	N.R	4.02	N.R	N.R	N.R	12.05	N.R	N.R	N.R	42.79	N.R	N.R
Diciembre	N.R	9.06	10.00	N.R	N.R	12.18	12.60	N.R	N.R	2.59	7.40	N.R	N.R	13.16	13.30	N.R	N.R	36.99	43.30	N.R
Promedio	9.29	9.67	9.16	11.88	12.63	11.85	13.71	13.26	3.66	3.57	6.18	8.74	13.23	10.98	12.14	12.99	38.81	36.07	41.19	46.88
Desv. Estándar	1.97	1.58	1.78	2.33	2.24	2.63	1.56	1.22	0.17	0.45	2.3	0.63	2.25	2.40	1.01	1.78	6.64	7.06	6.60	5.96

APÉNDICE 3. REGISTRO DE AFOROS REALIZADOS POR EL PROYECTISTA

Cuadro A.3.1. Registro de aforos del mes de agosto del 2017

Fecha (dd/mm/aa)	Fuente	Caragra	El Cedro	La Quebrada	El Tirrá
	Medición*				
11/08/17	1	2.34	1.13	2.64	1.09
	2	2.09	1.24	2.54	1.57
	3	2.06	1.09	5.36	1.41
	4	2.16	1.35	2.47	1.76
	5	2.42	1.05	2.35	1.36
25/08/17	1	1.79	1.5	2.59	1.74
	2	1.86	1.41	2.69	1.56
	3	1.74	1.39	2.65	1.48
	4	1.81	1.4	2.8	1.6
	5	1.79	1.37	2	1.84
Promedio tiempos (s)		2.01	1.29	2.81	1.54
Caudal Agosto ($L \cdot s^{-1}$)		10.87	16.86	7.76	14.15
Desviación estándar		1.28	2.18	1.71	2.42

Cuadro A.3.2. Registro de aforos del mes de setiembre del 2017

Fecha (dd/mm/aa)	Fuente	Caragra	El Cedro	La Quebrada	El Tirrá
	Medición*				
08/09/17	1	2.01	1.64	2.27	1.95
	2	1.97	1.43	2.47	1.69
	3	1.99	1.55	2.48	1.48
	4	2.04	1.48	2.43	1.35
	5	2.11	1.51	2.37	2.01
22/09/17	1	1.78	1.43	2.41	1.65
	2	1.83	1.44	2.25	1.54
	3	1.75	1.38	2.39	1.55
	4	1.86	1.47	2.44	1.42
	5	1.99	1.28	2.53	1.49
Promedio tiempos (s)		1.93	1.46	2.40	1.61
Caudal Setiembre ($L \cdot s^{-1}$)		11.28	14.92	9.07	13.52
Desviación estándar		0.71	1.01	0.34	1.71

Cuadro A.3.3. Registro de aforos del mes de octubre del 2017

Fecha (dd/mm/aa)	Fuente Medición*	Caragra	El Cedro	La Quebrada	El Tirrá
10/10/17	1	1.63	1.74	2.73	1.53
	2	2.13	1.54	2.52	1.41
	3	2	1.5	2.61	1.53
	4	2.05	1.32	2.54	1.5
	5	2.38	1.6	2.65	1.58
20/10/17	1	1.95	1.42	2.45	1.67
	2	2.61	1.48	2.63	1.59
	3	2.4	1.32	2.78	1.54
	4	2.12	1.41	2.62	1.69
	5	2.15	1.29	2.74	1.55
Promedio tiempos (s)		2.14	1.46	2.63	1.56
Caudal Octubre (L·s⁻¹)		10.18	14.91	8.30	13.98
Desviación estándar		1.39	1.40	0.33	0.73

Cuadro A.3.4. Registro de aforos del mes de noviembre del 2017

Fecha (dd/mm/aa)	Fuente Medición*	Caragra	El Cedro	La Quebrada	El Tirrá
03/11/17	1	2.25	1.89	2.8	1.68
	2	2.55	1.52	2.39	1.34
	3	2.26	1.6	2.54	1.38
	4	1.8	1.58	2.78	1.4
	5	2.38	1.65	2.67	1.36
17/11/17	1	2.59	1.79	3.02	2.03
	2	2.62	1.88	2.78	1.75
	3	2.04	1.73	2.56	1.82
	4	2.15	1.78	2.6	1.53
	5	2.39	1.6	2.98	2.02
Promedio tiempos (s)		2.14	2.30	1.70	2.71
Caudal Noviembre (L·s⁻¹)		10.18	9.47	12.81	8.04
Desviación estándar		1.39	1.17	0.98	0.59

Cuadro A.3.1. Registro de aforos del mes de diciembre del 2017

Fecha (dd/mm/aa)	Fuente Medición*	Caragra	El Cedro	La Quebrada	El Tirrá
		Tiempos (s)			
01/12/17	1	2.56	1.86	2.38	2.17
	2	2.5	1.48	2.51	2.04
	3	2.5	1.56	2.48	1.92
	4	1.98	1.57	2.26	2.08
	5	1.89	1.58	2.98	1.97
12/12/17	1	1.94	1.27	2.71	1.85
	2	2.17	1.64	2.64	1.48
	3	2.04	1.71	2.78	1.51
	4	2.03	1.72	2.66	1.56
	5	2.14	1.54	2.72	1.44
Promedio tiempos (s)		2.18	1.59	2.61	1.80
Caudal Diciembre (L·s⁻¹)		10.02	13.68	8.35	12.10
Desviación estándar		1.12	1.46	0.68	1.97

*Los aforos con un recipiente de volumen conocido, el cual corresponde a 21,8 L.

10. APENDICE 4. REGISTRO DE ANÁLISIS DE LABORATORIO

Cuadro A.4.1. Registro histórico de análisis de laboratorio efectuados para evaluar la calidad del recurso hídrico de las captaciones de la ASADA Santa Cruz de Turrialba.

Periodo	Nacientes	Concentración de contaminantes (mg·L ⁻¹)				
		Calcio	Magnesio	Sulfato	Dureza Total	Potasio
II - 2009	Caragra	43,5	33,5	109,8	247	7,7
	El Cedro	63,5	54,3	253,6	382	12
	La Quebrada	-	-	-	-	-
	El Tírrá	50,4	43,2	203,1	304	11
II - 2012	Caragra	69,7	51	254,26	384	17,2
	El Cedro	72,9	60,1	272,88	430	16,7
	La Quebrada	-	-	-	-	-
	El Tírrá	47,5	33,7	113,18	257	10,5
I - 2014	Caragra	96,6	71,2	446,3	535	15,8
	El Cedro	73,7	57,3	300	420	11,3
	La Quebrada	-	-	-	-	-
	El Tírrá	53,2	30,1	159	257	8,2
II - 2014	Caragra	65,6	49,2	250,83	367	-
	El Cedro	76,4	62,6	356,95	448	-
	La Quebrada	68,6	54,8	279,05	397	-
	El Tírrá	35,2	23,3	109,26	184	6,6
I - 2016	Caragra	-	72	402	528	-
	El Cedro	-	63	334	463	-
	La Quebrada	-	59	284	433	-
	El Tírrá	-	49	188	376	-

Cuadro A.4.2. Registro de análisis de laboratorio efectuados por el proyectista para evaluar la calidad del recurso hídrico de las captaciones de la ASADA Santa Cruz de Turrialba.

Fecha (dd/mm/aa)	Parámetro (mg·L ⁻¹)	Naciente			
		Caragra	El Cedro	La Quebrada	El Tirrá
11/08/17	Calcio	85	89	86	58
	Magnesio	68	76	72	42
	Sulfato	325	350	352	191
	Dureza Total	492	535	511	318
	Potasio	16	15	14	10
25/08/17	Calcio	80	77	75	54
	Magnesio	64	62	59	38
	Sulfato	362	346	347	191
	Dureza Total	NR	NR	NR	NR
	Potasio	NR	NR	NR	NR
08/09/17	Calcio	92	92	90	78
	Magnesio	70	71	69	41
	Sulfato	355	359	351	164
	Dureza Total	518	522	509	364
	Potasio	16	15	14	10
22/09/17	Calcio	93	95	91	59
	Magnesio	67	71	67	32
	Sulfato	359	363	330	175
	Dureza Total	508	530	503	279
	Potasio	17	16	14	10
10/10/17	Calcio	84	88	90	49
	Magnesio	63	71	72	26
	Sulfato	311	355	351	136
	Dureza Total	469	512	521	229
	Potasio	15	14	14	8
20/10/17	Calcio	80	84	84	48
	Magnesio	70	75	74	38
	Sulfato	388	412	388	174
	Dureza Total	488	519	514	276
	Potasio	15	14	14	8
03/11/17	Calcio	84	87	82	50
	Magnesio	72	77	72	40
	Sulfato	358	330	363	166
	Dureza Total	506	534	501	290
	Potasio	16	14	13	9

Continuación del cuadro A.4.2.

Fecha (dd/mm/aa)	Parámetro (mg·L ⁻¹)	Naciente			
		Caragra	El Cedro	La Quebrada	El Tirrá
17/11/17	Calcio	86	86	86	51
	Magnesio	70	72	71	37
	Sulfato	321	329	326	152
	Dureza Total	503	511	507	280
	Potasio	16	15	14	9
01/12/17	Calcio	76	81	82	36
	Magnesio	62	69	68	32
	Sulfato	343	360	317	139
	Dureza Total	445	486	485	222
	Potasio	14	13	14	7,5
12/12/17	Calcio	80	85	87	46
	Magnesio	62	73	66	31
	Sulfato	352	335	345	152
	Dureza Total	455	513	489	243
	Potasio	15	14	13	8,3

**APÉNDICE 5. DATOS DE MICROMEDICIÓN APORTADOS POR LA
ADMINISTRACIÓN DEL ACUEDUCTO RURAL DE SANTA CRUZ DE TURRIALBA**

Cuadro A.5.1. Datos generales de micromedición

Parámetro	Cantidad	Detalles/Observaciones
Habitantes	3563	Distrito Santa Cruz -INEC-2012
Abonados (2016)	906	Informe ASADAS TLBA - 2016
Abonados (2018)	933	Entrevista Administradora - 2018
Abonados activos	834	Entrevista Administradora - 2018
Pajas activas	924	No coincide con número de abonados
Pajas activas con medidor	193	Datos al 18/04/2018
Pajas activas sin medidor	731	Datos al 18/04/2018
Número de medidores	225	Datos al 18/04/2018
Compra de medidores	50	aproximadamente al mes

Cuadro A.5.2. Datos de consumo (m³) según la cantidad y tipo de pajas activas

Fecha (mm/aa)	Cantidad de Pajas activas			Metros cúbicos (m³)		
	Domiciliar	No domiciliar	Totales	Domiciliar	No domiciliar	Totales
09/17	122	45	167	2288	3779	6067
10/17	139	51	190	1938	2748	4686
11/17	138	45	183	1575	2576	4151
12/17	142	46	188	1639	3694	5333
01/18	146	45	191	2329	4158	6487
02/18	152	45	197	2549	3904	6453
03/18	152	43	195	2567	3557	6124
04/18	157	44	201	3066	4162	7228

Cuadro A.5.3. Resumen de pajas activas al mes de abril del 2018.

Localidad	Domiciliar	Comercial	Especial	Industrial	Otras	Total
Santa Cruz	247	4	21	2	0	274
El Carmen	218	3	10	2	0	233
San Rafael	257	1	6	1	0	265
Verbena Norte	149	0	2	0	0	151
La Pastora	0	0	1	0	0	1
Totales	871	8	40	5	0	924
Porcentaje	94,26	0,87	4,33	0,54	0,00	100,00

Cuadro A.5.4. Resumen de pajas inactivas al mes de abril del 2018.

Localidad	Domiciliar	Comercial	Especial	Industrial	Otras	Total
Santa Cruz	54	6	9	1	0	70
El Carmen	47	1	10	1	0	59
San Rafael	30	1	5	1	0	37
Verbena Norte	15	0	0	0	0	15
La Pastora	1	0	0	0	0	1
Totales	147	8	24	3	0	182
Porcentaje	80,77	4,40	13,19	1,65	0,00	100,00

11. APÉNDICE 6. PROYECCIÓN DE LA POBLACIÓN PARA LA COMUNIDAD DE SANTA CRUZ DE TURRIALBA

Cuadro A.6.1. Proyección de la población para la comunidad de Santa Cruz de Turrialba.

Año proyectado	Método lineal o aritmético	Método geométrico	Método logarítmico	Promedio
2020	3034	3044	3415	3164
2021	3014	3026	3439	3160
2022	2995	3008	3463	3155
2023	2976	2991	3487	3151
2024	2956	2973	3511	3147
2025	2937	2956	3536	3143
2026	2918	2939	3561	3139
2027	2898	2922	3585	3135
2028	2879	2905	3610	3131
2029	2859	2888	3636	3128
2030	2840	2871	3661	3124
2031	2821	2854	3687	3120
2032	2801	2837	3712	3117
2033	2782	2821	3738	3114
2034	2763	2805	3764	3110
2035	2743	2788	3790	3107
2036	2724	2772	3817	3104
2037	2705	2756	3844	3101
2038	2685	2740	3870	3098
2039	2666	2724	3897	3096
2040	2646	2708	3925	3093
2041	2627	2692	3952	3090
2042	2608	2676	3979	3088
2043	2588	2661	4007	3085
2044	2569	2645	4035	3083
2045	2550	2630	4063	3081
2046	2530	2615	4092	3079
2047	2511	2599	4120	3077
2048	2492	2584	4149	3075
2049	2472	2569	4178	3073
2050	2453	2554	4207	3071

12. APÉNDICE 7. COMPARACIÓN DE RESINAS DISPONIBLES COMERCIALMENTE

Cuadro A.7.1. Comparación de resinas disponibles comercialmente.

Resina			Revisión bibliográfica		
Nombre	Cantidad (g)	Precio (\$)	Título/doi	Año de publicación	Observaciones
<u>IRA 400</u> <u>Cl</u>	500	136	Arsenic removal from groundwater by ion exchange and adsorption processes: comparison of two different materials. DOI: 10.2166/ws.2015.054	2015	<ul style="list-style-type: none"> Se indica como el sulfato era un interferente en el proceso, según Chiavola et al. 2012, debido a que este compuesto compite con el arsénico en el proceso de intercambio iónico.
			Competitive removal of dissolved organic matter (DOM) and inorganic anions by anion exchange resins (AERs) DOI: 10.2166/ws.2012.037	2012	<ul style="list-style-type: none"> Comparó 2 resinas (IRA-910 y Purolite) Esta resina tuvo la eliminación más baja de carbón orgánico disuelto. Adsorbió un 90% del sulfato en la muestra de agua.
<u>IRA-910</u>	1 000	133	Speciation analysis of inorganic arsenic in river water by Amberlite IRA 910 resin immobilized in a polyacrylamide gel as a selective binding agent for As(V) in diffusive gradient thin film technique DOI: 10.1039/c4an00555d	2014	<ul style="list-style-type: none"> La resina tuvo la capacidad de remover As(V) en un rango de pH de 5-9 y una fuerza iónica que varía entre 0.001-0.1 mol/L

Continuación del cuadro A.7.1.

Resina			Revisión bibliográfica		
Nombre	Cantidad (g)	Precio (\$)	Título/doi	Año de publicación	Observaciones
<u>Dowex</u> <u>21K</u>	1 000	194	Removing nitrate from water using iron-modified Dowex 21K XLT ion exchange resin: Batch and fluidised-bed adsorption studies DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.seppur.2015.12.022	2016	<ul style="list-style-type: none"> El sulfato “compite” y por ende reduce la adsorción de nitrato en este experimento.
			Removal of phosphorus by a high rate membrane adsorption hybrid system DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2015.11.045	2016	<ul style="list-style-type: none"> Esta resina tiene la capacidad de adsorber sulfato (17 mg-S / g)
<u>Dowex</u> <u>Marathon</u> <u>11</u>	250	122	Competition Impact of Sulfate on NOM Removal by Anion-Exchange Resins in High-Sulfate and Low-SUVA Waters DOI: dx.doi.org/10.1021/ie401814v	2013	<ul style="list-style-type: none"> Se trabajó con concentraciones de sulfato de 17-300 mg/L y de 390-600 mg/L El sulfato tiene a inhibir la remoción de otros compuestos debido a la alta selectividad que tienen las resinas con el sulfato.

