



INSTITUTO COSTARRICENSE DE  
ACUEDUCTOS Y ALCANTARILLADOS

# Alternativas para eliminación de olor en aguas subterráneas de la comunidad de Aguas Frías.


Informe Final

**CÓDIGO: GTE-106-02-F3**

CONSECUTIVO DEL DOCUMENTO: **2021-106-90**

VERSIÓN 01.

Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados  
+506 2242-5000 \* [www.aya.go.cr](http://www.aya.go.cr)  
Pavas, San José, Costa Rica

	<b>Informe técnico</b>			Página 2 de 124
Macroproceso: Gestión Técnica	Proceso: Investigación y Desarrollo	Subproceso: Investigación Aplicada	CÓDIGO: GTE- 106-02-F3	<b>N° de Versión:</b> 01
Elaborado por: Laura Hernández	Revisado por: Andrés Lazo Páez	Aprobado por: German Mora Rodríguez	Fecha de aprobación: 0708/19	

## PÁGINA DE APROBACIONES

Elaborado por:

Rodolfo Araya Álvarez

Revisado por:

Andrés Lazo Páez

Aprobado por:

German Mora Rodríguez



**Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados  
Centro de Documentación e Información  
UEN Investigación y Desarrollo**



**AUTORIZACIÓN INSTITUCIONAL PARA PUBLICAR TESIS, ESTUDIOS,  
ARTÍCULOS Y/O INFORMES PROPIEDAD INTELECTUAL DE AyA EN EL  
REPOSITORIO DIGITAL DEL CEDI**

Yo, Jorge Luis Zapata Arroyo

---

---

N° Cédula: 2-0564-875

---

Dependencia: Gerencia General

---

Autorizo como Gerente General y representante legal del Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA) cédula jurídica 4-000-042138 al Centro de Documentación e Información (CEDI) de la UEN Investigación y Desarrollo la inclusión, publicación y difusión en su Repositorio Digital y Catálogo en línea (OPAC) la documentación incluida en la lista adjunta.

Se trata de estudios y documentos cuyos derechos intelectuales y de uso son exclusivos de nuestra institución.

E-mail: [gerenciageneral@aya.go.cr](mailto:gerenciageneral@aya.go.cr) N° Teléfono: 2242-5090

Firma: \_\_\_\_\_



## TABLA DE CONTENIDOS

1	INTRODUCCIÓN .....	8
1.1	Objetivos.....	8
1.1.1	Objetivo General.....	8
1.1.2	Objetivos específicos.....	8
2	METODOLOGÍA.....	9
2.1	Conformación del equipo.....	9
2.2	Actividades realizadas.....	10
3	Resultados.....	11
3.1	Aguas Subterráneas.....	11
3.2	Causas u origen de las afectaciones por olor en aguas subterráneas.....	12
3.2.1	Ácido sulfhídrico.....	12
3.2.2	Geosmina y 2-metilisoborneol (MIB).....	13
3.3	Materia orgánica natural en agua.....	15
3.3.1	Química de la NOM.....	17
3.3.2	Determinación y clasificación de la NOM.....	18
3.3.3	Subproductos de la desinfección/oxidación (SPD).....	18
3.4	Bacterias del hierro.....	21
3.5	Amonio/amoniaco.....	23
3.6	Hierro y manganeso.....	24
3.7	Determinaciones de calidad.....	30
3.7.1	Primer grupo de análisis de calidad de agua realizados.....	30
3.7.2	Segundo grupo de análisis de calidad de agua realizados.....	35
3.7.3	Tercer grupo de pruebas realizadas.....	36
3.7.4	Cuarto grupo de pruebas realizadas.....	55
3.8	Sistema de tratamiento del agua.....	64
3.8.1	Procesos de potabilización mediante medios granulares.....	65
3.8.2	Proceso de potabilización mediante el uso de membranas.....	97
4	Conclusiones.....	116
5	Recomendaciones.....	119



6	Referencias bibliográficas.....	123
---	---------------------------------	-----

## TABLA DE FIGURAS

Figura 1.	Ejemplo de gráfica $E_H$ -pH para el hierro.....	26
Figura 2.	Ejemplo de gráfica $E_H$ -pH para manganeso.....	27
Figura 3.	Medición de caudal en sitio.....	38
Figura 4.	Determinaciones presuntivas realizadas.....	40
Figura 5.	Curva de punto de quiebre para muestra de agua analizada.....	44
	Condiciones: T = 27°C, pH=7.6 y T=30 min.....	44
Figura 6.	Curva de punto de quiebre para rango determinado.....	45
Figura 7.	Agua que sale durante la purga de las tuberías.....	53
Cuadro 14.	Resultados de análisis realizados a muestras de agua de purga.....	57
Figura 8.	Muestras 1 y 2 de agua sucia.....	58
Figura 9.	Muestras 2 y 3 de agua sucia.....	59
Figura 10.	Muestras 4 y 5 de agua sucia.....	60
Figura 11.	Fotografía del proceso de digestión.....	61
Figura 12.	Esquema de tratamiento propuesto.....	67
Figura 13.	Filtro de malla autolimpiante.....	70
Figura 14.	Perfil de saturación de medio adsorbente y curva de ruptura.....	71
Figura 15.	Tolvas plásticas para espesado de aguas de lavado de medios.....	79
Figura 16.	Imagen del proceso de utilización de los lechos de secado.....	81
Figura 17.	Esquema de caseta existente.....	83
Figura 18.	Esquema general de procesos y operaciones.....	85
Figura 19.	Procesos de potabilización.....	86
Figura 20.	Cisterna de agua tratada y sistema de gestión de aguas residuales.....	88



Figura 21. Datos de ingreso.....	99
Figura 22. Datos y resultados para pestaña de Agua de Alimentación.....	101
Figura 23. Datos y resultado de la Ultrafiltración.....	102
Figura 24. Esquema resumen de la UF.....	104
Figura 25. Configuración para etapa de Ósmosis Inversa.....	106
Figura 26. Esquema representativo de sistema de tratamiento de agua salobre o salada. ....	112

### TABLA DE CUADROS

Cuadro 1. Funcionarios de AyA que participaron del desarrollo y validación de este informe. ...	9
Cuadro 2. Resultados de los análisis realizados. ....	31
Cuadro 3. Análisis microbiológico de muestras de agua en dos puntos distintos del sistema. ...	36
Cuadro 4. Pruebas realizadas al inicio del bombeo – agua cruda (03/11/2020). ....	39
Cuadro 5. Resultados de las pruebas presuntivas para 72 horas de funcionamiento del pozo.	41
Cuadro 6. Prueba de demanda de cloro. Volumen de muestra: 50 mL. ....	43
Cuadro 7. Algunos compuestos en el agua que pueden ser oxidados con cloro. ....	46
Cuadro 8. Análisis de THM realizados. ....	48
Cuadro 8. Pruebas después de 72 horas de bombeo. ....	49
Cuadro 9. Datos relacionados con materia orgánica en agua. ....	50
Cuadro 10. Resumen de resultados de análisis realizado por LNA. ....	50
Cuadro 11. Determinaciones para muestra de agua sucia, tomada el 06/11/20. ....	54
Sitio: purga cercana a caseta de pozo. ....	54
Cuadro 12. Análisis de H <sub>2</sub> S. Muestra preservada.....	55
Cuadro 13. Determinaciones de H <sub>2</sub> S para muestras de agua cruda y agua clorada. ....	56
Cuadro 15. Determinaciones de metales pesados para muestras de agua sucia.....	62
Cuadro 16. Datos base y resultados preliminares obtenidos para la etapa de GAC.....	72



Cuadro 17. Datos base y resultados preliminares para la filtración en $MnO_2$ .	74
Cuadro 18. Residuos producidos del lavado del GAC.	76
Cuadro 19. Lavado del material filtrante.	77
Cuadro 20. Desglose del consumo y costos de energía.	91
Cuadro 21. Consumo de cloro y costo asociado. Concentración de cloro al 12%. Caudal de PP: 6.7 L/s.	91
Cuadro 22. Monitoreo del funcionamiento del sistema de potabilización.	92
Cuadro 23. Costo de transporte y disposición de residuos sólidos.	93
Cuadro 24. Costo de reemplazo de material adsorbente (GAC).	95
Cuadro 25. Costo de reemplazo del medio filtrante $MnO_2$ .	95
Cuadro 26. Costo estimado de operación y mantenimiento.	96
Cuadro 27. Calidad de agua producida (esperada) por el proceso de UF.	103
Cuadro 28. Características principales de la etapa de ósmosis inversa.	106
Cuadro 29. Calidad esperada para el permeado y rechazo de las membranas de RO.	107
Cuadro 30. Ajustes químicos del proceso de RO.	109
Cuadro 31. Costos asociados al tratamiento por membranas.	115

**ABREVIATURAS**

<b>Símbolo</b>	<b>Descripción</b>
Al	Aluminio
As	Arsénico
AP	Administración de Proyectos
AyA	Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados
B	Boro
Ba	Bario
Ca	Calcio
COD	Carbono orgánico disuelto
COT	Carbono Orgánico Total
Fe	Hierro
GAC	Carbón Activado Granular
H <sub>2</sub> S	Ácido sulfhídrico
ID	Investigación y Desarrollo
LNA	Laboratorio Nacional de Aguas
L/s	Litros por segundo
MF	Microfiltración
mg/L	miligramos por litro
Mn	Manganeso
MnO <sub>2</sub>	Dióxido de manganeso
NF	Nanofiltración
NOM	Materia orgánica natural
NO <sub>3</sub> <sup>1-</sup>	Nitratos
m <sup>3</sup> /s	metros cúbicos por segundo
pH	Potencial hidrógeno
PP	Planta Potabilizadora
PyC	Programación y Control
RCAP	Reglamento para la Calidad del Agua
RO	Reverse osmosis
SAID	Subgerencia Ambiental, Investigación y Desarrollo
SD	Sistemas Delegados
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Sulfatos
SPD	Subproductos de la desinfección
Sr	Estroncio
SRB	Bacterias reductoras de sulfatos
SUVA	Absorbancia específica UV
TDS	Sólidos Disueltos Totales
THM	Trihalometanos
UEN	Unidad Estratégica de Negocios
UF	Ultrafiltración.
UFC	Unidades formadoras de colonias
UV <sub>254</sub>	Absorbancia UV <sub>254</sub>



## 1 INTRODUCCIÓN

El agua del pozo de abastecimiento de la ASADA de Aguas Frías de Pococí tiene un olor desagradable que ha generado la queja de los abonados del sistema. En algunos de los análisis de calidad de agua realizados por el LNA el parámetro de Olor sale como No Aceptable. Adicionalmente, en todas las visitas que se han realizado como parte de las actividades de esta investigación, se ha notado un olor desagradable como a “huevo podrido” en el agua que se extrae del pozo.

En el [Informe de Avance #1](#) de este proyecto (junio 2020), se resaltan los principales resultados obtenidos en la visita inicial a la ASADA de Aguas Frías y las pruebas de campo realizadas en la misma; adicionalmente, se detallan los pasos propuestos a seguir para dar continuidad a la investigación. En este informe se presentan los resultados obtenidos de las investigaciones realizadas, con el fin de responder los objetivos planteados en la [solicitud](#) de Asesoría Técnica.

Para dar respuesta a los puntos antes mencionados, se realizaron una serie de actividades que se describen más adelante, los resultados obtenidos de las mismas son objeto final de este informe.

### 1.1 Objetivos.

#### 1.1.1 Objetivo General.

- Conocer la(s) posible(s) causa(s) y alternativas tecnológicas existentes para mejorar la calidad del agua de la ASADA de Aguas Frías.

#### 1.1.2 Objetivos específicos.

- Identificar las posibles causas de la afectación reportada por lo abonados de la ASADA de Aguas Frías, con respecto al olor a “huevo podrido” que presenta el agua del pozo.



- Determinar las alternativas más viables para mejorar la calidad del agua, de ser necesario.
- Realizar una estimación preliminar del costo (inversión) de una alternativa para mejorar la condición de calidad de agua, de ser necesario.
- Realizar una estimación preliminar del costo de operación y mantenimiento de una alternativa para mejorar la calidad de agua, de ser necesario.

## 2 METODOLOGÍA.


### 2.1 Conformación del equipo.

El equipo de trabajo para el desarrollo de este informe de avance de proyecto es el que se presenta en el cuadro 1.

**Cuadro 1. Funcionarios de AyA que participaron del desarrollo y validación de este informe.**

Nombre	Área funcional donde labora	Función
German Mora Rodríguez	UEN ID	Revisión y aprobación del proceso e informe
María de los Ángeles Abarca Álvarez	UEN AP	Desarrollo de la investigación
Marcos Anchía Céspedes	UEN AP	Desarrollo de la investigación
Jimena Orozco Gutiérrez	LNA	Apoyo técnico
Pablo Rivera Navarro	LNA	Apoyo técnico
David Cambroner Bolaños	LNA	Apoyo técnico
Andrés Lazo Páez	UEN ID	Dirección del proceso de investigación
Rodolfo Araya Álvarez	UEN ID	Desarrollo de la investigación

*Referencia: Elaboración propia.*

	<b>Informe técnico</b>		Página <b>10</b> de <b>124</b>
	<b>CÓDIGO:</b> GTE-106-02-F3	<b>N° de Versión:</b> 01	

## **2.2 Actividades realizadas.**

Las actividades realizadas para el desarrollo de este informe de proyecto fueron las siguientes:

1. Visitar el sistema de abastecimiento de la ASADA y conocer la opinión de la Junta Directiva y del fontanero de la ASADA con respecto a la calidad del agua.
2. Investigar en la literatura las posibles causas de olor en aguas subterráneas y su relación con diferentes parámetros de calidad.
3. Realizar determinaciones de ciertos parámetros de calidad del agua que pudiesen estar relacionados con la presencia de olor en la misma.
4. Ejecutar una prueba de monitoreo de calidad del agua con una duración aproximada de 72 horas.
5. Realizar pruebas de demanda de cloro y de cloración al punto de quiebre del agua del pozo.
6. Llevar a cabo pruebas de formación de subproductos de la desinfección a muestras de agua preparadas en sitio.
7. Efectuar análisis de efecto del cloro sobre el olor del agua.
8. Analizar y caracterizar varias muestras de agua con color y turbiedad (sucias), tomadas en varios de los puntos de limpieza de red.
9. Definir los principales procesos y operaciones requeridos para tratar el agua de la ASADA de Aguas Frías.
10. Realizar un dimensionamiento preliminar de los procesos requeridos para tratar el agua mencionada y los residuos generados en el proceso de potabilización.



11. Realizar un esquema en planta de los procesos del sistema de potabilización.
12. Utilizar la base de datos de proyectos de potabilización del Área Funcional de Investigación Aplicada para estimar el costo de capital del sistema de tratamiento propuesto.
13. Definir los principales aspectos relacionados con la operación y mantenimiento del sistema de potabilización propuesto, desde mano de obras hasta consumibles.
14. Utilizar la información disponible en las bases de datos y en el mercado para estimar los costos de operar el sistema de potabilización en estudio.


### **3 Resultados.**

En las vistas realizadas a la ASADA de Aguas Frías, se pudo identificar y percibir el olor desagradable que presenta el agua del pozo de la comunidad. Como se mencionó en el Informe de Avance previo a este documento, el olor genera molestia y desconfianza en los abonados del sistema sobre la calidad del agua. Aunado al tema del olor, se presenta con cierta frecuencia, la existencia de agua con color y sólidos (partículas) en el sistema de distribución.

#### **3.1 Aguas Subterráneas.**

Muchas fuentes de agua subterráneas son sustratos confinados, que por consiguiente limitan la disponibilidad de oxígeno; lo cual puede provocar que para su potabilización se requiera de métodos de tratamiento distintos a los utilizados en las fuentes superficiales. Estas condiciones muy frecuentemente requieren que el tratamiento del agua se realice para remover sustancias reducidas como el hierro, manganeso, sulfuro de hidrógeno, amonio y arsénico (Edzwald, 2011).

Estos sustratos confinados también pueden proteger al agua de la contaminación por patógenos microbianos, provocando que los métodos para el tratamiento de este tipo de

	<b>Informe técnico</b>		Página <b>12</b> de <b>124</b>
	<b>CÓDIGO:</b> GTE-106-02-F3	<b>N° de Versión:</b> 01	

contaminantes difieran de los aplicados en aguas superficiales. Las estrategias “multi-barrera” que combinan la desinfección con los procesos de remoción de partículas, no son requeridos para algunas fuentes de agua subterránea. Sin embargo, no todas las fuentes de aguas subterráneas son iguales, y algunas están sujetas a la influencia directa de las aguas superficiales, requiriendo el uso de barreras de tratamiento para patógenos.


La calidad de las aguas subterráneas varía ampliamente dependiendo de la naturaleza de la geología a través de la cual fluye. Las variaciones pueden ser regionales o a través de las capas del acuífero en una región, resultando en diferencias importantes que requieren de distintas secuencias de procesos en el tratamiento del agua y que dependen de las características generales como lo son: la dureza, los sólidos totales disueltos y la presencia de contaminantes naturales específicos. Mientras las concentraciones de Carbono Orgánico Total (COT) en muchas de las fuentes de agua subterránea son generalmente bajas (< 2 mg/L), algunas veces contienen concentraciones elevadas de COT que requieren de estrategias de tratamiento para limitar la formación de subproductos de la desinfección que están regulados.

### **3.2 Causas u origen de las afectaciones por olor en aguas subterráneas.**

La mayoría de los olores y sabores de las fuentes de agua subterráneas son de origen natural. Por ejemplo, los sabores y olores son causados por la acción bacteriana dentro del acuífero de agua subterránea o por la disolución de sales y minerales al percolar y fluir el agua a través de los depósitos geológicos. La intrusión de sales o aguas mineralizadas (como el agua marina) puede resultar en problemas de olor y sabor (Crittenden, 2011).

#### **3.2.1 Ácido sulfhídrico.**

En aguas subterráneas y en algunos sistemas de distribución, un olor altamente desagradable a ácido sulfhídrico (H<sub>2</sub>S) puede generarse por la acción de bacterias anaeróbicas sobre los sulfatos. Este olor a “huevo podrido” puede ser detectado a

	<b>Informe técnico</b>		Página 13 de 124
	<b>CÓDIGO:</b> GTE-106-02-F3	<b>N° de Versión:</b> 01	

concentraciones menores de 0.1 µg/L. La bacteria *Desulfovibrio desulfuricans* es la que generalmente se encuentra responsable por la producción de H<sub>2</sub>S. Otros compuestos sulfurados producidos por bacterias, los cuales pueden causar sabores y olores a pantano o a pescado en los sistemas de distribución, incluyen: polisulfuro de dimetilo y metil mercaptano. Varios tipos de bacterias *Pseudomonas* pueden causar compuestos sulfurados molestos (Edzwald, J. 2011).

El umbral de olor para el H<sub>2</sub>S en agua es menor a 100 ng/L (0.1 µg/L), y olores de aguas que contienen 0.1 a 0.5 mgH<sub>2</sub>S/L o más se consideran ofensivos. Los sulfuros en aguas subterráneas resultan de la actividad anaeróbica bacteriana sobre el azufre orgánico, azufre elemental, los sulfatos y sulfitos (Crittenden. 2011.).

El mantener un residual de cloro en el sistema de distribución es una medida importante para controlar el crecimiento de ciertos microorganismos, muchos de los cuales crecen en biopelículas en las tuberías. Sin embargo, si constituyentes no patogénicos como las bacterias del hierro, bacterias nitrificadoras o bacterias del sulfuro, han crecido excesivamente en los sistemas de distribución, la demanda de cloro puede incrementarse significativamente. La subsecuente disminución del residual de cloro puede permitir el crecimiento de microorganismos en el sistema de distribución, especialmente en las áreas de bajo flujo.

El Reglamento para la Calidad del Agua Potable (RCAP) en Costa Rica, Decreto Ejecutivo N° 38924-S, en su anexo 1, cuadro 5 Parámetros de Calidad de Agua Nivel Cuarto (N4), en la sección de Otros Parámetros Físicos e Inorgánicos, establece para el H<sub>2</sub>S un Valor Máximo Admisible (VMA) de 0.05 mg/L.

### **3.2.2 Geosmina y 2-metilisoborneol (MIB).**


La producción de compuestos olorosos por organismos acuáticos es una preocupación importante para las empresas del agua; la mayoría de los acontecimientos o brotes ligados a problemas de olor y sabor son causados por el crecimiento microbiano.



Frecuentemente se reportan eventos de sabor y olor desagradables, en ambientes naturales, por la presencia de geosmina y MIB. En las aguas de consumo humano, la geosmina y MIB son los principales metabolitos causantes de problemas de sabor y olor. Imparten al agua un olor a “tierra mojada”. El umbral de olor para la geosmina y el MIB es muy bajo y, por ende, concentraciones de estos compuestos del orden de partes por trillón (ng/L) pueden ser detectados fácilmente por el sentido olfatorio del ser humano (André, C. 2019).

La fuente más importante de geosmina y MIB son las bacterias; dentro de las cuales se incluyen: Actinobacteria, Cianobacteria y Mixobacteria. En los ambientes acuáticos los principales productores de la geosmina y el MIB son las Cianobacterias (André, C.2019). Las Actinobacterias, se conocen por ser las principales productoras de metabolitos olorosos en el suelo; estos organismos se encuentran frecuentemente en los sedimentos de lagos, donde juegan un rol importante en la degradación de la materia orgánica. Las Mixobacterias, que también tienen la habilidad de sintetizar metabolitos olorosos han sido detectadas en aguas superficiales. Compuestos como la geosmina y MIB, que deterioran la calidad del agua, se asocian usualmente con floraciones estacionales de cianobacterias como: *Oscillatoria*, *Anaebana flos-aquae*, *Planktothrix* y *Microcystis aeruginosa*. Se han encontrado también presencia de metabolitos olorosos relacionados con el decaimiento de las floraciones (André, C. 2019).

Las cianobacterias son organismos antiguos que se caracterizan por conjugar el proceso de la fotosíntesis oxigénica con una estructura celular bacteriana. Son procariotas y autótrofas; unicelulares, coloniales o filamentosas. También se les llama algas verdeazuladas (antiguamente) debido a que poseen sustancias fotosintéticas del tipo clorofila y ficocianina, un pigmento de color azulado. Como pueden realizar la fotosíntesis, desprenden oxígeno.

	<b>Informe técnico</b>		Página <b>15</b> de <b>124</b>
	<b>CÓDIGO:</b> GTE-106-02-F3	<b>N° de Versión:</b> 01	


### **3.3 Materia orgánica natural en agua.**

La materia orgánica natural (NOM, por sus siglas en inglés) es el término que se utiliza para describir la compleja matriz de químicos orgánicos que se originan por fuentes naturales presentes en todos los cuerpos de agua. Se origina por la actividad biológica, que incluye secreciones de la actividad metabólica de algas, protozoarios, microorganismos y formas de vida superiores; la descomposición de materia orgánica por bacterias, y excreciones de los peces y de otros organismos acuáticos. La NOM puede ser llevada a un cuerpo de agua desde la tierra, originándose de las mismas actividades biológicas, pero sufriendo distintas reacciones debido a la presencia del suelo y de distintos organismos (Crittenden. 2011).

Históricamente, el significado de NOM en el agua para consumo se relacionó con su impacto en la calidad estética, pues imparte un tono amarillento al agua, que puede ser no agradable para muchas personas. Recientemente, la preocupación de la NOM se ha enfocado en su habilidad de reaccionar con el cloro y formar subproductos de la desinfección (SPD); que pueden ser cancerígenos. Algunos de los efectos o impactos de la NOM en el agua son:

- **Color:** en altas concentraciones puede impartir un tono amarillento al agua.
- **SPD:** la NOM puede reaccionar con desinfectantes químicos, formando SPD. Muchos de estos subproductos han demostrado ser carcinogénicos o tener otros efectos adversos en la salud pública.
- **Metales/orgánicos sintéticos:** la NOM puede acomplejarse con metales y químicos orgánicos hidrofóbicos (como los pesticidas); haciéndolos más solubles. Una vez estos químicos son solubles, pueden ser transportados más fácilmente en el ambiente acuático y son más difíciles de remover durante el tratamiento.

En las fuentes de agua para consumo, la medición más común de la NOM se hace a través de la determinación de Carbono Orgánico Total (TOC, por sus siglas en inglés ó

	<b>Informe técnico</b>		Página <b>16</b> de <b>124</b>
	<b>CÓDIGO:</b> GTE-106-02-F3	<b>N° de Versión:</b> 01	

COT en español), como una medida indirecta. Las concentraciones típicas de COT para distintas aguas se encuentran en los siguientes rangos (Crittenden, 2011):

- De 0.5 a 5 mg/L en agua de mar.
- De 0.1 a 2 mg/L en aguas subterráneas.
- De 1.0 a 20 mg/L en aguas superficiales.
- De 75 a 250 mg/L en pantanos.
- De 50 a 1 000 mg/L para aguas residuales.
- De 7.5 a 40 mg/L para efluentes de tratamiento biológicos secundarios.
- De 0.2 a 0.75 mg/L para efluentes de tratamiento biológico secundario con microfiltración y ósmosis inversa.

En el tratamiento del agua para consumo, la presencia de la NOM tiene los efectos que se detallan a continuación.

- Desinfección. La NOM reacciona con y consume los desinfectantes, por lo que la dosis requerida para alcanzar una desinfección efectiva es mucho mayor de la que se requiere en la ausencia de NOM.
- Coagulación. La NOM reacciona con y consume los coagulantes, por lo que la dosis requerida para alcanzar una remoción efectiva de turbiedad es mucho mayor de la que se requiere en la ausencia de NOM.
- Adsorción. La NOM se adsorbe sobre el carbón activado, rápidamente disminuyendo la capacidad de adsorción de este. Las isothermas de adsorción son mucho más difíciles de predecir en la presencia de NOM.
- Membranas. La NOM se adsorbe en las membranas, tapando los poros de estas e incrustándose en su superficie; provocando una reducción rápida en el flujo a través de la membrana.



- Distribución. La NOM puede ser biodegradable, provocando corrosión y crecimiento de depósitos en los sistemas de distribución (especialmente cuando se utilizan oxidantes durante el tratamiento).

### 3.3.1 Química de la NOM.

La materia biológica se compone principalmente de cuatro clases de compuestos orgánicos: carbohidratos, lípidos, aminoácidos y ácidos nucleicos. La NOM se forma a partir de estos químicos y los productos de las reacciones químicas bióticas y abióticas entre las moléculas de la NOM o entre la NOM y los constituyentes inorgánicos del agua. La amplia gama de actividad biológica en el ambiente da paso a la producción de miles de distintos químicos, por lo cual la NOM es una mezcla compleja de distintos compuestos con propiedades químicas distintas, lo cual puede variar significativamente de un cuerpo de agua a otro como resultado del suelo local, clima, y las condiciones hidrológicas. Esta complejidad dificulta la caracterización química básica de la NOM y causa que para distintos cuerpos de agua tenga distintos efectos cuando está sometida a los procesos de tratamiento del agua.

La NOM no es volátil, es bastante soluble y puede concentrarse hasta más de 1 000 mg/L sin precipitar. La mayoría de las moléculas de la NOM se encuentran cargadas negativamente y tienen múltiples grupos funcionales aniónicos, convirtiéndolas en poli electrolíticas. Las moléculas de la NOM tienen una distribución de pesos moleculares con alrededor del 90% de esta comprendida entre 500 a 3 000 Dalton. La composición elemental de la NOM es de aproximadamente: 45 a 60 por ciento carbono, 4 a 5 por ciento hidrógeno, 35 a 40 por ciento oxígeno y 1 por ciento de nitrógeno (Crittenden. 2011).

Basado en su solubilidad en ácidos y bases, los humatos (sal formada por la combinación de un ácido húmico y una base) acuáticos se dividen usualmente en dos componentes principales: ácidos húmicos (HA), los cuales son solubles en soluciones alcalinas diluidas, pero precipitan cuando se acidifican; y los ácidos fúlvicos (FA), los



cuales se mantienen en solución a valores bajos de pH. Las características estructurales de los HA y los FA son similares, pero difieren considerablemente en su peso molecular y la composición de su grupo funcional. El peso molecular de los FA varía entre 200 a 1 000 g/mol, mientras el peso molecular de los HA puede llegar a alcanzar valores de hasta 200 000 g/mol. La fracción de FA también posee un mayor contenido de constituyentes que contienen oxígeno por unidad de peso en comparación con los ácidos húmicos. Sin embargo, debido a la naturaleza arbitraria de este modelo de clasificación, el término material húmico se usa frecuentemente en referencia a un agregado de FA y HA.

### 3.3.2 Determinación y clasificación de la NOM.

La complejidad de la NOM hace impráctico la medición rutinaria de compuestos individuales. Sin embargo, la NOM se cuantifica típicamente utilizando parámetros generales. Los parámetros más frecuentemente utilizados en el tratamiento de aguas son: carbono orgánico total (TOC), carbono orgánico disuelto (DOC), carbono orgánico disuelto biodegradable (BCOD), carbono orgánico asimilable (AOC), absorbancia  $UV_{254}$  y absorbancia específica UV (SUVA). La SUVA se calcula como:

$$SUVA = \frac{UV_{254}}{DOC} \times 100$$

donde:


SUVA = absorbancia específica UV, L/mg\*m

$UV_{254}$  = absorbancia UV a 254 nm,  $cm^{-1}$

DOC = concentración de carbono orgánico disuelto, mg/L

### 3.3.3 Subproductos de la desinfección/oxidación (SPD).

El uso de productos químicos para la desinfección y oxidación es muy común en los sistemas para el tratamiento del agua para consumo humano. La reacción entre los desinfectantes/oxidantes y la materia orgánica presente en el agua, puede producir la aparición de SPD. En Costa Rica, el RCAP en su cuadro 5 (Nivel Cuarto - N4) regula la

	<b>Informe técnico</b>		Página <b>19</b> de <b>124</b>
	<b>CÓDIGO:</b> GTE-106-02-F3	<b>N° de Versión:</b> 01	

presencia de desinfectantes y subproductos de la desinfección. Entre los SPD más conocidos se encuentran los THM: bromoformo ( $\text{CHBr}_3$ ), dibromoclorometano ( $\text{CHBr}_2\text{Cl}$ ), bromodichlorometano ( $\text{CHBrCl}_2$ ) y cloroformo ( $\text{CHCl}_3$ ).

Es importante mencionar que debe existir un balance con respecto a minimizar la formación de los SPD con la necesidad de maximizar la desinfección. Al formarse los SPD por la reacción de varios constituyentes del agua con los desinfectantes, una manera de disminuir la formación de SPD podría ser reduciendo la concentración del desinfectante en el agua y/o el tiempo que está presente en el agua. Lo anterior, produce una afectación directa de la eficiencia de la desinfección, y por ende aminora la protección de la salud de los consumidores ante la exposición a microorganismos que puedan causarles enfermedades. Por ende, cualquier esfuerzo para reducir la formación de los SPD a través de minimizar la concentración del desinfectante y/o el tiempo de contacto durante el tratamiento del agua debe de balancearse con respecto a la necesidad de reducir el riesgo microbiológico a través de una adecuada desinfección. (Crittenden. 2012).

### **3.3.3.1 Subproductos del cloro libre.**

De los subproductos de cloración conocidos, los principales subproductos de interés en la potabilización del agua son los trihalometanos (THM) y los ácidos halo acéticos (HAAs).


De manera general, el cloro reacciona con la NOM y los iones bromuro para formar subproductos halogenados. Independientemente de los mecanismos específicos involucrados en la formación de los subproductos de la cloración; mayores concentraciones de estos subproductos se forman con mayores concentraciones de material orgánico precursor, iones bromuro (precursor inorgánico), o cloro. (Crittenden. 2012).



Los THMs y los HAAs se generan de forma simultánea cuando el cloro reacciona con la NOM, pero las condiciones ideales para la formación de THM son distintas a las condiciones para la formación de HAA. Se cree que el mecanismo de reacción que lleva a la formación de los THM se cataliza por la presencia de iones hidroxilo ( $\text{OH}^-$ ) en el agua y por ende procede más rápidamente a pH más alcalinos. Por el contrario, la formación de HAAs se mejora bajo condiciones ácidas. Por lo tanto, el pH influye directamente si se favorece la formación de THM o de HAA.

La presencia de bromuros incrementa la concentración másica de THMs formados cuando el cloro reacciona con la NOM. Lo anterior, debido a que se requiere más cloro para reaccionar con los bromuros y porque el peso molecular del bromo es mayor al del cloro. El tipo de NOM presente en el agua también afecta la cantidad de SPD formados. En aguas naturales, la NOM consiste en fracciones húmicas (hidrofóbicas) y no húmicas (hidrofílicas/polares). En muchas (pero no todas) aguas naturales, la NOM hidrofóbica contribuye más a la formación de THM y HAA que la hidrofílica. La absorbancia específica (SUVA) es un indicador de calidad de agua importante que se correlaciona adecuadamente con la cantidad de NOM hidrofóbica en agua; valores altos de SUVA puede ser un indicador de que el agua esté predispuesta a mayor formación de THM y HAA. (Crittenden. 2012).

Se indica que el valor de TOC antes de la desinfección primaria, utilizando cloro, no debe exceder 2.0 mg/L. Adicionalmente, indica que a valores de TOC superiores a 4.0 mg/L, es muy probable que los niveles de trihalometanos (THM) superen los 100  $\mu\text{g/L}$  (regulación europea) si el tiempo de residencia del agua en la red es de 2 a 3 días y si se requiere mantener un valor de cloro residual en el agua para consumo. Sin embargo, se señala que es posible que se genere la formación de THMs en niveles menores a estos, en algunas circunstancias ( $\text{TOC} > 2.0 \text{ mg/L}$ ). Por ende, si los niveles de TOC son superiores a 4 mg/L, se requiere de trabajos remediales en el sistema; mientras tanto, si el nivel se encuentra entre 2 a 4 mg/L, se requiere de un estudio más detallado para determinar si estos niveles de TOC pueden llevar a la formación de THMs (EPA, 2012).

	<b>Informe técnico</b>		Página <b>21</b> de <b>124</b>
	<b>CÓDIGO:</b> GTE-106-02-F3	<b>N° de Versión:</b> 01	

Según la Agencia de Protección Ambiental de Irlanda, la concentración y tipo de NOM y su propensión para formar THMs se evalúan usualmente utilizando parámetros sustitutos. Los parámetros sustitutos más frecuentemente utilizados son el Carbono Orgánico Total (TOC) y Disuelto (DOC) y la absorbancia UV a 254 nm de longitud de onda (UV<sub>254</sub>).

Se indica que mientras la absorbancia UV refleja la concentración total de precursores en el agua, la naturaleza y reactividad de estos se evalúa de mejor manera utilizando el parámetro absorbancia específica UV (SUVA). Este último, se correlaciona bien con la aromaticidad e hidrofobicidad del carbono orgánico y por ende su potencial para formar THM. Se indica:

- Valores de SUVA menores a 2 generalmente indican una alta fracción de materia hidrofílica no húmica con baja absorbancia UV, una baja demanda de cloro y bajo potencial de formación de THMs.
- Valores de SUVA entre 2 a 4 son indicativo de una mezcla de materia hidrofóbica húmica e hidrofílica no húmica, con absorbancia UV media, una demanda de cloro mayor y un potencial de formación de THM mayor.
- Valores de SUVA superiores a 4 son indicativo de la presencia de materia húmica hidrofóbica altamente aromática, asociada con alta absorbancia UV, alta demanda de cloro y alto potencial de formación de THM.

### **3.4 Bacterias del hierro.**

Desde la mitad del siglo XIX, se reconocieron ciertos tipos de bacterias filamentosas por su habilidad de remover el hierro de las soluciones, precipitando hidróxidos de hierro (III) fuera de sus células. Estudios posteriores sobre las transformaciones del hierro por acción bacteriana en agua, han demostrado que la deposición de hidróxido férrico insoluble se ha asociado con un grupo de bacterias muy heterogéneo; que incluye



muchas formas no filamentosas. El término “bacterias del hierro” se ha utilizado para identificar a las bacterias asociadas con la precipitación de hierro en agua; es un término general utilizado para describir a un grupo diverso de organismos que pueden ocurrir en un amplio rango de hábitats, donde se incluyen: lagos, lagunas, estuarios, “suampos”, pantanos y otros (Hackett, G. 1985).

Varias de estas bacterias del hierro, además de depositar hidróxidos férricos alrededor de sus células, son capaces de excretar polisacáridos extracelulares que se han descrito en la literatura como sustancias gelatinosas o “babosas”. Este material extracelular cubre la superficie exterior de la pared celular del organismo y sirve de sitio para la acumulación de hidróxido férrico precipitado. Con el tiempo, este material puede impregnarse con óxidos de hierro resultando en una masa babosa de color café rojizo, que tipifica el crecimiento de bacterias precipitadoras de hierro en los ambientes naturales (Hackett, G. 1985).

Las bacterias del hierro que se encuentran en los sistemas de distribución de agua, pozos y drenajes, se consideran agentes de ensuciamiento o formadores de incrustaciones, por su habilidad dual de excretar sustancias gelatinosas (“babas”) y precipitar grandes cantidades de hidróxido férrico. En estas instancias, el crecimiento gelatinoso de las bacterias del hierro y sus depósitos de hidróxidos férricos ha resultado en: aguas con cambios de color que las hacen no apetecibles, sabores y olores desagradables y reducciones del flujo en las tuberías. Adicionalmente, se le ha relacionado a las bacterias del hierro como agentes indirectos de la corrosión en las tuberías de distribución de agua como resultado de su habilidad para crear un ambiente adecuado para otros organismos relacionados con los procesos de corrosión en metales. Las manifestaciones de estas bacterias en los pozos son consideradas como la causa más predominante de degradación bacteriana del desempeño de los pozos, provocando una reducción en la eficiencia hidráulica del sistema (Hackett, G. 1985).




Existe un debate continuo sobre el metabolismo de las bacterias del hierro, donde algunos autores las proponen como quimioautótrofas y otros como heterótrofas. Según Hackett (1985) los hidratos de hierro bacterianos sobre hierro y acero proveen de un sustrato adecuado y microambiente anaeróbico para el crecimiento de las bacterias sulfato reductoras (SRB), responsables por la corrosión metálica.

Existía anteriormente un concepto erróneo acerca de las bacterias del hierro, indicando que estos organismos atacaban las superficies metálicas en agua con el fin de utilizar el hierro durante su crecimiento. Estudios posteriores demostraron que estas bacterias son capaces de crecer sobre materiales no ferrosos sumergidos en agua, y que sus requerimientos nutricionales de hierro pueden ser obtenidos por el hierro ferroso disuelto encontrado en solución. Aún y cuando las bacterias del hierro actualmente no se ven como agentes directos de corrosión, existe la teoría de que estos organismos ayudan a que se den ciertos procesos electrolíticos y pueden promover el crecimiento de otras bacterias directamente involucradas en la corrosión metálica (Hackett, G. 1985).

Según Starkey (1945), las bacterias del hierro se asocian con los procesos de corrosión como resultado de las “babas” extracelulares producidas y los depósitos de hidratos férricos, los cuales proveen un ambiente adecuado para el crecimiento de las SRB. Las bacterias reductoras de sulfatos son anaeróbicas y capaces de desarrollarse en las zonas anóxicas localizadas entre la superficie de metal y los productos orgánicos e hidratos de hierro acumulados y producidos por las bacterias del hierro. En el proceso metabólico de estas bacterias, se oxida la materia orgánica y se reducen los sulfatos a sulfuros. Los sulfuros resultantes, se combinan con el hidrógeno para formar sulfuro de hidrógeno.

### **3.5 Amonio/amoniaco.**

El término amoniaco incluye las especies no ionizadas ( $\text{NH}_3$ ) e ionizadas ( $\text{NH}_4^+$ ). El amoniaco y el amonio en el ambiente se originan por procesos metabólicos, agrícolas e industriales y por la desinfección con cloraminas. Los niveles naturales en aguas

	<b>Informe técnico</b>		Página <b>24</b> de <b>124</b>
	<b>CÓDIGO:</b> GTE-106-02-F3	<b>N° de Versión:</b> 01	

subterráneas y superficiales se encuentran normalmente por debajo de los 0.2 mg/L. Las aguas subterráneas anaeróbicas pueden llegar a contener hasta 3 mg/L. La contaminación por amoníaco y amonio también puede darse por la presencia de morteros de cemento en los revestimientos de la tubería. En el agua es un indicador de posible contaminación bacteriana, aguas residuales y residuos de animales (WHO, 2017).


El amoníaco en el agua para consumo no es de relevancia inmediata para la salud, y por ende la Organización Mundial de la Salud (WHO) no ha propuesto un valor guía (WHO, 2017). Sin embargo, la presencia de esta sustancia puede comprometer la eficiencia en la desinfección, resultar en la formación de nitritos en los sistemas de distribución, causar el fallo de los filtros para la remoción de manganeso y puede causar problemas por sabor y olor.

Según la WHO, el umbral de olor para el amoníaco a un pH alcalino es de aproximadamente 1.5 mg/L, y se propone un umbral para el sabor de 35 mg/L para el catión de amoníaco (amonio).

### **3.6 Hierro y manganeso.**

Según Lazo (2018), el agua subterránea anaerobia puede contener concentraciones de hierro ferroso en el orden de miligramos por litro, sin mostrar necesariamente alguna coloración o turbiedad al estar recién extraída del pozo. Al ser expuesta a la atmósfera o a algún oxidante, el hierro ferroso se oxida a férrico, generando una coloración rojiza o café al agua. La presencia de este metal puede promover el crecimiento de bacterias del hierro, las cuales obtienen su energía de la oxidación biológica de este elemento; lo cual puede provocar la formación de depósitos pastosos o “babosos” dentro de tuberías y otros accesorios de los sistemas de acueductos.

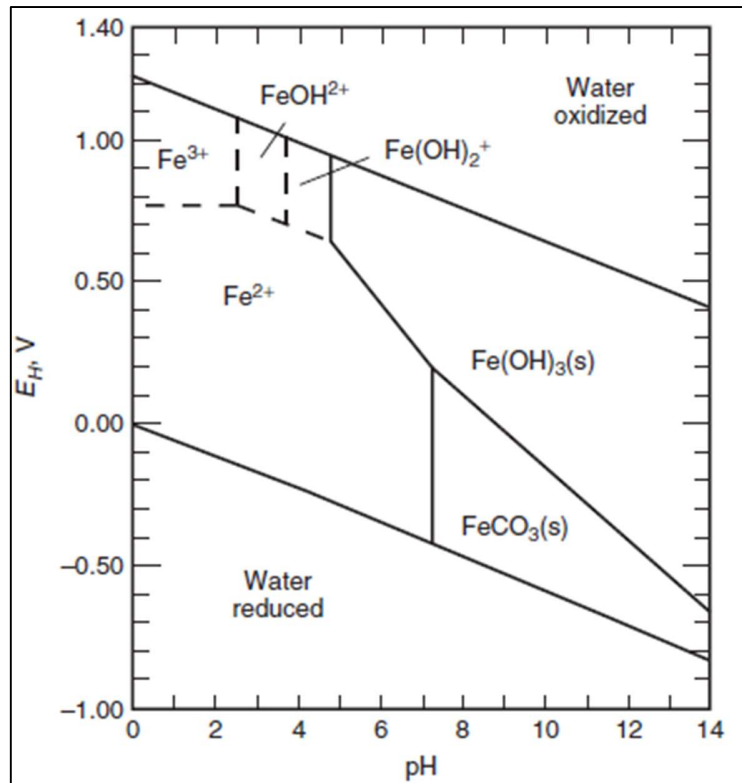
El manganeso, en algunas ocasiones, acompaña la presencia del hierro en el agua subterránea. Se encuentra generalmente en un estado de oxidación reducido, como  $Mn^{+2}$ ; al oxidarse tiende a precipitar y acumularse como depósito en los sistemas de

	<b>Informe técnico</b>		Página <b>25</b> de <b>124</b>
	<b>CÓDIGO:</b> GTE-106-02-F3	<b>N° de Versión:</b> 01	

distribución de agua y con el tiempo se desprende provocando un deterioro de la calidad de esta. El origen de ambos metales en estas aguas es típicamente geológico.

Para comprender las posibles especies de hierro que se pueden encontrar en el agua, se han desarrollado gráficas específicas de potencial de oxidación-reducción versus pH. El potencial de reducción-oxidación (redox,  $E_H$ ) es una manera de cuantificar que tan reductora u oxidante es un agua; valores positivos indican potencial oxidante y negativos reductor (Lazo, 2018).

En la siguiente figura se presenta la gráfica de  $E_H$ -pH para el hierro, bajo ciertas condiciones específicas del agua.

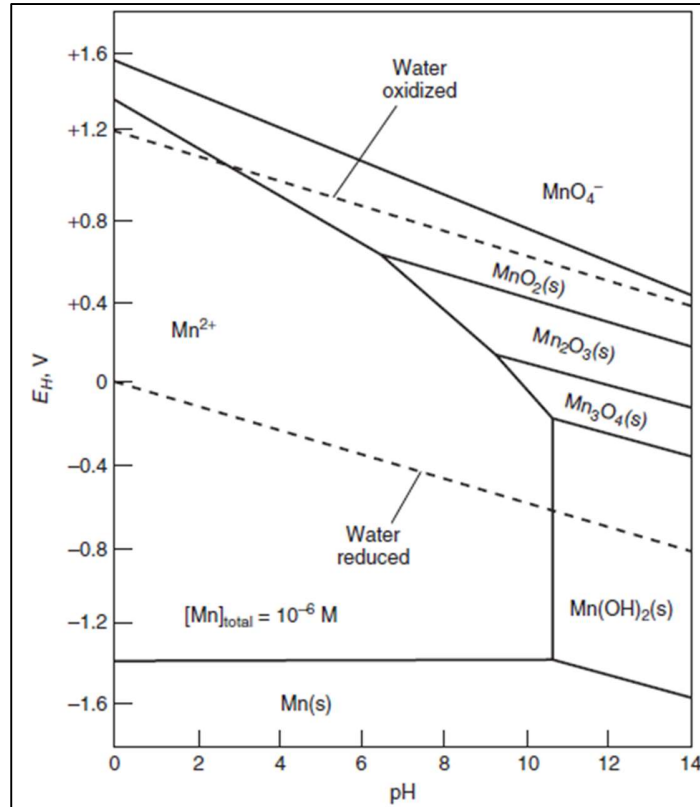
Figura 1. Ejemplo de gráfica  $E_H$ -pH para el hierro.

Referencia: Crittenden (2011).

Según Lazo (2018), para un valor de pH fijo, conforme se incrementa el potencial redox, así se irá pasando de agua con hierro ferroso (soluble) a un fluido que contenga este compuesto en una forma insoluble. De hecho, para aguas de origen natural, es posible observar que conforme se incrementa el valor de pH, así de probable es que se alcancen formas insolubles de hierro con un valor bajo de potencial redox.

Con respecto al manganeso, a valores de pH de la mayoría de las aguas naturales, este se encuentra como  $Mn^{+2}$ , reducido y soluble. La oxidación del manganeso puede producir distintos óxidos insolubles como puede observarse en la figura 2, dependiendo de los valores de  $E_H - pH$ , entre ellos:  $MnO_{2(s)}$ ,  $Mn_2O_{3(s)}$  y  $Mn_3O_{4(s)}$ ; siendo la forma predominante  $MnO_{2(s)}$  (Lazo, 2018).

**Figura 2. Ejemplo de gráfica  $E_H$ -pH para manganeso.**



*Referencia: Crittenden (2011).*

Desde el punto de vista de salud pública, la Organización Mundial de la Salud (WHO, 2017) establece que no existe una afectación a la salud comprobada por la presencia de hierro en agua para consumo, aunque sí es posible que exista rechazo por parte del consumidor debido a aspectos estéticos. El hierro es un elemento esencial para la nutrición humana, particularmente aquel en estado ferroso. Como precaución frente a alguna potencial acumulación excesiva de hierro en el cuerpo, se ha fijado un valor de 0.8 mg/kg de masa corporal (procedente de todas las fuentes de consumo). El supuesto de consumo de un 10% del total por medio del agua potable, permite estimar un valor cercano a 2 mg/l en términos preventivos. No obstante, en agua, arriba de 0.3 mg/l ya se presentan problemas estéticos (Lazo, 2018).




Para el manganeso, la Organización Mundial de la Salud (WHO, 2017) indica que la mayor proporción del consumo procede de alimentos. Esta misma fuente cita que 0.4 mg/l en agua potable es un valor reconocido como protección de la salud, con base en un consumo diario de 11 mg/d, según dietas típicas, y empleando un factor de seguridad de 3. Esta misma fuente, también indica que concentraciones superiores a 0.1 mg/l de este metal son causantes de sabor no deseado en bebidas y manchas en losa sanitaria y hasta en la ropa (Lazo, 2018).

El Reglamento para la Calidad de Agua Potable vigente en Costa Rica, establece un valor máximo admisible de 0.3 mg/L para el hierro y de 0.5 mg/L para el manganeso; para este último se establece un Valor Alerta de 0.1 mg/L. Adicionalmente, se indica que donde se encuentren los dos metales juntos, se aplica un valor máximo admisible de 0.3 mg/L para la suma de ambas concentraciones.

La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA, por sus siglas en inglés), establece Regulaciones Nacionales Primarias para Agua de Consumo (NPDWRs, por sus siglas en inglés) y Regulaciones Nacionales Secundarias para Agua de Consumo (NSDWRs, por sus siglas en inglés). Las NPDWRs establecen los estándares de calidad de agua mandatorios para los contaminantes del agua para consumo. A estos estándares se les denomina los niveles máximos de contaminante (MCLs, por sus siglas en inglés) y se establecen para proteger al público contra el consumo de contaminantes en el agua que presentan un riesgo para la salud humana. El MCL es el valor máximo admisible de un contaminante en el agua para consumo que se entrega a los consumidores (EPA, 2020).

Adicionalmente, la EPA ha establecido las NSDWRs, que establecen estándares de calidad de agua no mandatorios para 15 contaminantes. La EPA no hace obligatorio el cumplimiento de estos niveles secundarios de contaminación (SMCLs, por sus siglas en inglés); están establecidos como guías para asistir a los sistemas públicos de abastecimiento de agua en la gestión de esta para consumo por aspectos estéticos,


	<b>Informe técnico</b>		Página <b>29</b> de <b>124</b>
	<b>CÓDIGO:</b> GTE-106-02-F3	<b>N° de Versión:</b> 01	

como el sabor, color y olor. Estos contaminantes, no se considera que presenten un riesgo para la salud humana en los valores de SMCL. La EPA considera que, si estos contaminantes se encuentran presentes en el agua en valores por encima del SMCL, pueden producir coloración, sabor y mal olor al agua, lo que ocasionaría que muchas personas dejaran de usar el agua. Para el caso del hierro y manganeso, la EPA establece SMCLs de 0.3 mg/L y de 0.05 mg/L respectivamente. (EPA, 2020).

Según Postwana (2013), el hierro y manganeso, incluso a concentraciones menores a las recomendadas por las Guías de la OMS, pueden ser una causa de problemas para los operadores de los sistemas de abastecimiento. Indica que los problemas más comunes son:

- Precipitación de sedimentos en las tuberías.
- Formación de manchas en los recipientes de lavado, baños y la ropa lavada.
- Desarrollo de bacterias del hierro y manganeso en la red de distribución, lo cual puede ocasionar la corrosión de las tuberías y más desarrollo microbiológico.
- Sabor metálico del agua.
- Deterioro del olor del agua.
- Incremento del color del agua.

Los sedimentos y las biopelículas reducen el diámetro de las tuberías, ocasionando un incremento de las pérdidas hidráulicas y de costos de energía. La corrosión bacteriana y química reduce significativamente el grado de confiabilidad de la red de distribución de agua, causando un incremento en los costos de reparación. Esta corrosión también resulta en el deterioro de la calidad del agua entregada a los consumidores. Según Postwana (2013) este fenómeno ocurre generalmente a concentraciones de hierro y manganeso que exceden de 0.3 mgFe/L y 0.1 mgMn/L, respectivamente. Sin embargo,

	<b>Informe técnico</b>		Página <b>30</b> de <b>124</b>
	<b>CÓDIGO:</b> GTE-106-02-F3	<b>N° de Versión:</b> 01	

estas concentraciones no protegen la red de distribución de agua de la acumulación de sedimentos. La empresa Anglian Water de Reino Unido, fijó los límites de acción para sus procesos de tratamiento de agua a concentraciones de 0.05 mg/L para el hierro y 0.02 mg/L para manganeso. Estos valores representan el desempeño alcanzable por una planta potabilizadora de remoción de hierro y manganeso bien diseñada y operada; y sirven para minimizar los problemas de “agua sucia”

### **3.7 Determinaciones de calidad.**

#### **3.7.1 Primer grupo de análisis de calidad de agua realizados.**

Como seguimiento al informe de Avance I, donde se identificaron parámetros de calidad de agua que se recomendaron monitorear con el fin de poder determinar el origen del olor en el agua del pozo de la ASADA de Aguas Frías. Los parámetros propuestos y que fueron monitoreados (casi en su totalidad) son:

- a. Sulfuro total.
- b. Sulfuro de hidrógeno.
- c. Carbono orgánico total y disuelto.
- d. Absorción UV a 254 nm ( $UV_{254}$ ) y absorción específica UV a 254 nm (SUVA).
- e. Amonio.
- f. Hierro.
- g. Manganeso.
- h. Bacterias anaeróbicas reductoras de sulfato.
- i. Geosmina y MIB.



Los parámetros de las viñetas a, b, c, d, h, i no se realizan de manera rutinaria o del todo el método no se encuentra implementado por el Laboratorio Nacional de Aguas. Debido a esto, se procedió a contactar a varios laboratorios externos al AyA y se les consultó si ellos pueden determinar los parámetros mencionados en la matriz agua; en caso positivo, se solicitó la confección de una proforma.

El día 11 de agosto del 2020, se realiza una gira técnica en compañía de la Ing<sup>a</sup>. María de los Ángeles Abarca y el Ing. Marcos Anchía, ambos funcionarios de la UEN de Administración de Proyectos de la Subgerencia de Sistemas Delegados, con la finalidad de tomar muestras de agua cruda del pozo de la ASADA y llevarlas a analizar a un laboratorio privado. Las muestras tomadas fueron puntuales y se recogieron durante el funcionamiento diario del sistema de bombeo del pozo.

El día 07 de setiembre del 2020, se reciben los resultados completos de los análisis solicitados (N° Referencia: A-20/083137-M1), los cuales se presentan en el cuadro 2.

**Cuadro 2. Resultados de los análisis realizados.**

Parámetro	Valor	Unidades	Límite de cuantificación
Amonio	1.6	mg/L	0.05
Azufre	< 1	mg/L	1.00
Bacterias Anaerobias Sulfito Reductoras	3.00	UFC/mL	1.00 – 1.00 x 10 <sup>6</sup>
Carbono Orgánico Disuelto	5.35	mg/L	1.00
Carbono orgánico total	5.70	mg/L	1.00
Hidrógeno sulfurado	< 0.05	mg/L	0.05
Hierro	0.105	mg/L	0.015
Manganeso	0.0466	mg/L	0.003
Sulfatos	2.3	mg/L	0.46
Sulfuro total	< 0.05	mg/L	0.05



Parámetro	Valor	Unidades	Límite de cuantificación
SUVA	1.08	L/mg*m	0.001
UV <sub>254</sub>	0.058	cm <sup>-1</sup>	0.001

Referencia: N° A-20/083137-M1; AGQLabs, 2020.

### 3.7.1.1 Amonio.


Con respecto al parámetro de amonio (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), en el análisis de la muestra se obtiene una concentración de 1.6 mg/L; valor superior al VMA establecido en el RCAP (0.5 mg/L). Según lo indicado en el apartado 3.5 de este documento, la presencia de esta sustancia en el agua se puede relacionar con procesos metabólicos, agrícolas e industriales; y es un indicador de posible contaminación bacteriana, de aguas residuales y residuos animales (WHO, 2017). Adicionalmente, en estas concentraciones puede ser percibido por el ser humano a un pH alcalino.

### 3.7.1.2 Hierro y manganeso.

Los valores obtenidos por el laboratorio AGQLabs, respecto a los parámetros de hierro y manganeso, son muy similares a los encontrados en la base de datos del LNA para esta ASADA. Con respecto a lo indicado en el apartado 3.6 de este documento, estos valores cumplen con el RCAP vigente en Costa Rica. Con respecto a los estándares de calidad de agua de la EPA el valor de manganeso está muy cercano al nivel secundario máximo del contaminante (SMCL, 0.05 mg/L).

### 3.7.1.3 Bacterias anaerobias sulfito reductoras.

Se obtiene un resultado que indica que la muestra contenía 3 UFC/mL. Según conversación realizada con funcionarios de la empresa AGQLabs, se indica que este tipo de bacterias por ser anaeróbicas, son muy difíciles de atrapar en un muestreo de este tipo; lo anterior, porque tienden a precipitar y encontrarse en el fondo del pozo.

	<b>Informe técnico</b>		Página <b>33</b> de <b>124</b>
	<b>CÓDIGO:</b> GTE-106-02-F3	<b>N° de Versión:</b> 01	

#### **3.7.1.4 Carbono orgánico total (TOC) y disuelto (DOC).**


De los análisis realizados por la empresa AGQLabs a las muestras de agua, se obtiene una concentración de TOC de 5.70 mg/L y de DOC de 5.35 mg/L. Según la información detallada en la sección **3.3**, y según Crittenden (2011) los valores típicos de TOC para aguas subterráneas se encuentran entre 0.1 a 2 mg/L. Como puede observarse, el valor obtenido en la muestra de agua es superior a los valores típicos de las aguas subterráneas.

Adicionalmente, según la Agencia de Protección Ambiental de Irlanda, como el valor de TOC es superior a 4 mg/L, es posible que se puedan generar concentraciones de THM superiores a los 100 µg/L, si el tiempo de residencia del agua en la red es de 2 a 3 días y si se mantiene cloro residual en la misma. (ver sección **3.3.3.1**).

Respecto al parámetro de DOC, según AGQLabs se obtiene una concentración de 5.35 mg/L. Lo anterior indica que la mayor cantidad de carbono en el agua se encuentra de forma disuelta.

#### **3.7.1.5 Absorbancia UV a 254 nm (UV<sub>254</sub>) y absorbancia específica UV (SUVA).**

Se obtuvo un valor de SUVA de 1.08 mg/L\*m que al compararlo con lo mencionado por la Agencia de Protección Ambiental de Irlanda (2012) y comentado en el apartado **3.3.3.1**, sugiere que la muestra de agua contiene una fracción alta de materia no húmica hidrofílica con baja absorbancia UV, baja demanda de cloro y bajo potencial de formación de THM. Lo anterior difiere de lo encontrado para el tema de COT y COD de las muestras. En este momento no se puede explicar las diferencias encontradas en los resultados y cómo correlacionarlos entre sí. Por esta razón se recomienda realizar más análisis de COT, COD, UV<sub>254</sub> y SUVA al agua del pozo; adicionalmente, valorar la posibilidad de realizarlos en distintos laboratorios acreditados. De igual manera, las determinaciones realizadas y detalladas más adelante en este informe, demuestran que sí se pueden generar SPD.

	<b>Informe técnico</b>		Página <b>34</b> de <b>124</b>
	<b>CÓDIGO:</b> GTE-106-02-F3	<b>N° de Versión:</b> 01	

### **3.7.1.6 Ácido sulfhídrico (H<sub>2</sub>S).**

Con respecto al H<sub>2</sub>S, en las determinaciones realizadas se obtiene que la concentración es menor a 0.05 mg/L, lo cual es menor al VMA establecido en el RCAP para esta sustancia. Según indica Crittenden (2011), el umbral del olor para este gas es de 0.1 µg/L (0.0001 mg/L); por lo que no puede descartarse que el olor que se percibe en el acueducto de Aguas Frías, no se deba a H<sub>2</sub>S. Es importante indicar que el día que se tomaron las muestras mencionadas, al abrir la llave de paso para realizar la toma, se detectó un olor desagradable que se mantuvo durante todo el tiempo que la llave estuvo abierta. El olor mencionado, podría describirse como a “huevo podrido” o a pantano, lo que es muy característico del H<sub>2</sub>S según indica la literatura, tal y como se menciona en apartados anteriores.

### **3.7.1.7 Otros.**

Con respecto a los parámetros: sulfatos, azufre y sulfuros, los valores obtenidos del análisis de las muestras de agua se consideran se encuentran dentro de los rangos esperados.

Para el caso de la geosmina y el MIB, según lo estudiado en la literatura, el olor relacionado con estos metabolitos es similar al de “tierra mojada”; lo cual es distinto al caso en estudio. Por la anterior razón, no se realizan los análisis para determinar estos compuestos en agua.

De los resultados obtenidos en el análisis de agua realizado, se puede concluir lo siguiente:

1. La concentración de amonio es superior al VMA del RCAP.
2. Aún y cuando el agua huele a “huevo podrido”, no se logra detectar la presencia de H<sub>2</sub>S en el agua.



3. Se encuentra la presencia de bacterias sulfato reductoras, las cuales generalmente está relacionadas a la producción de H<sub>2</sub>S en aguas subterráneas.
4. Las concentraciones de COT y COD parecen indicar la presencia de concentraciones de materia orgánica natural por encima de los valores típicos para aguas subterráneas.
5. Las concentraciones de hierro y manganeso se encuentran en valores menores a los VMA y VA establecidos en el RCAP.

Con los resultados obtenidos, no se pudo determinar de forma contundente el origen del olor en el agua del pozo de la ASADA; ni la causa de los problemas de color que aquejan a los abonados del sistema. Adicionalmente, los valores de COT y COD parecieran indicar la presencia de valores importantes NOM en el agua. Por las anteriores razones se decide continuar con las investigaciones respecto a la calidad del agua.

### **3.7.2 Segundo grupo de análisis de calidad de agua realizados.**

El martes 01 de setiembre 2020, la Ing<sup>a</sup>. María de los Ángeles Abarca y el Ing. Marcos Anchía, visitaron la ASADA de Aguas Frías para recolectar muestras de agua en dos puntos específicos del sistema de abastecimiento: agua cruda en la cachera del sistema de bombeo y agua clorada a la salida del tanque de almacenamiento. Ese mismo día se trasladan las muestras al LNA para que con el apoyo de la Unidad de Investigación en Agua, Ambiente y Salud se realicen análisis microbiológicos a las mismas. Adicionalmente, durante la visita se genera una queja de un abonado referida al color del agua y los funcionarios mencionados procedieron a recolectar una muestra para ser analizada presuntivamente por el área de Química de Agua Potable del LNA.

De los análisis microbiológicos realizados a las muestras de agua mencionadas, se obtienen los resultados que se presentan en el cuadro 3.



**Cuadro 3. Análisis microbiológico de muestras de agua en dos puntos distintos del sistema.**

Punto de muestreo	Parámetro	Valor	Unidades
Cachera pozo	Coliformes fecales	2.0	Coliformes/100 mL
Cachera pozo	<i>Clostridium perfringens</i>	Negativo	UFC/100 mL
Cachera pozo	<i>E. coli</i> 44.5°C	Negativo	NMP
Tanque	Coliformes fecales	Negativo	Coliformes/100 mL
Tanque	<i>Clostridium perfringens</i>	Negativo	UFC/100 mL
Tanque	<i>E. coli</i> 44.5°C	Negativo	NMP


*Referencia: Análisis microbiológico. N° reporte 157543.*

De los resultados del cuadro 3, es importante rescatar que se refieren a muestras puntuales y que las mismas podrían indicar que existe poco riesgo de contaminación fecal. Se recomienda mantener un monitoreo microbiológico periódico del agua del pozo. Estos análisis se realizan por existir actividades humanas cercanas a la fuente de agua; por ejemplo, una chanchera.

La muestra de agua relacionada a la queja del abonado, no se analizó en el LNA debido a que el color que presentaba era leve y se consideró que era mejor esperar a una muestra con mayor color para realizar análisis de metales.

### 3.7.3 Tercer grupo de pruebas realizadas.

Debido a que no fue posible relacionar el olor del agua del pozo con algún parámetro cuantitativo de los análisis realizados y previendo que, al crecer la demanda de agua de la ASADA por asumir otras comunidades cercanas, se va a requerir explotar el pozo durante más tiempo; se coordina con este operador para realizar una prueba en la que el pozo estuviese encendido bombeando agua durante 72 horas continuas. Durante la ejecución de este trabajo se realizarían pruebas para caracterizar el agua al inicio, transcurso y al final de la prueba.

	<b>Informe técnico</b>		Página 37 de 124
	<b>CÓDIGO:</b> GTE-106-02-F3	<b>N° de Versión:</b> 01	

Las pruebas realizadas se agruparon de la siguiente manera:

1. Al inicio y al final de la prueba de 72 horas, por laboratorio contratado: COD, COT, SUVA, UV<sub>254</sub>, H<sub>2</sub>S y Compuestos orgánicos volátiles.
2. Durante el desarrollo de la prueba, pruebas presuntivas realizadas por funcionarios de AyA: caudal, pH, potencial Redox, temperatura, conductividad, color aparente, turbiedad, hierro, manganeso, aluminio, sílice.
3. Prueba presuntiva de demanda de cloro.
4. Dos pruebas de determinación de THM a agua clorada.
5. Prueba de H<sub>2</sub>S en otro laboratorio privado.

Las pruebas se realizaron durante los días 03 a 06 de noviembre 2020. Con el fin de mantener el caudal de funcionamiento real del sistema, se decide mantener el bombeo del agua hacia los tanques de almacenamiento, y que el agua en exceso saliera por el rebalse de estos. Si se selecciona otro punto para disponer el agua en exceso las condiciones de carga cambiarían provocando un cambio en el caudal. Para monitorear el caudal, se instala un medidor ultrasónico de caudal de la UEN ID en la cachera del pozo. En la figura 3 se presenta el equipo utilizado; el caudal se mantuvo entre 8.4 a 9.0 L/s durante el transcurso de las pruebas.

**Figura 3. Medición de caudal en sitio.**



*Referencia: Del autor.*

Al inicio de la prueba se tomaron muestras de agua cruda para analizar los parámetros detallados en el punto 1 anterior y se trasladaron ese mismo día al laboratorio. Algunas de las muestras se preservaron para garantizar mejores resultados de los análisis. Los resultados obtenidos se detallan en el cuadro 4.

**Cuadro 4. Pruebas realizadas al inicio del bombeo – agua cruda (03/11/2020).**

Parámetro	Valor	Unidades	Límite de cuantificación
Carbono orgánico disuelto	2.09	mg/L	1.00 mg/L
Carbono orgánico total	2.46	mg/L	1.00 mg/L
Hidrógeno sulfurado	<0.05	mg/L	0.05 mg/L
SUVA	2.68	L/mg*m	0.001 L/mg*m
UV <sub>254</sub>	0.056	cm <sup>-1</sup>	0.001 cm <sup>-1</sup>
COVs	<1.00	µg/L	1.00

*Referencia: N° A-20/124053. AGQLabs, 2020.*

Entre los días 03 a 06 de noviembre, se realizaron pruebas presuntivas en sitio con los equipos y reactivos del Área Funcional de Investigación Aplicada. Las determinaciones fueron realizadas por los funcionarios del AyA; para ello se instalaron los equipos en sitio dentro de la caseta. En la figura 4 se presenta una fotografía de los funcionarios que realizaron las determinaciones y del acomodo de los equipos dentro de la caseta.



**Figura 4. Determinaciones presuntivas realizadas.**




*Referencia: Del autor.*

Los resultados obtenidos de las determinaciones presuntivas realizadas durante los días 03, 04, 05 y 06 de noviembre (72 horas de funcionamiento del pozo), se muestran en el cuadro 5.

**Cuadro 5. Resultados de las pruebas presuntivas para 72 horas de funcionamiento del pozo.**

Fecha	Hora	Punto muestreo	Q (L/s)	pH	ORP (mV)	Temp. (°C)	Cond. (µS/cm)	Color (Upt-Co)	Turb. (UNT)	Fe (mg/L)	Mn (mg/L)	Aluminio (mg/L)	Sílice (mgSiO <sub>2</sub> /L)	OD (ppm)	Resp.
03/11/20	11:55	Cachera	9.0	7.42	132	27.21	368	18	0	0.16	0.051			1.58	Marcos
03/11/20	15:25	Cachera	9.0	7.42	59.58	27.14	319	18	0	0.10	0.066			1.51	Cleo
04/11/20	9:02	Cachera	8.9	7.55	84.5	27.23	360	7	0	0.10	0.068	0.006		0.83	Rodolfo
04/11/20	10:58	Cachera	8.9	7.34	34.5	27.11	312	20	0	0.13	0.056			1.82	Cleo
04/11/20	11:47	Cachera	9.0	7.55	78.0	27.20	311	19	0	0.11	0.057			2.23	Cleo
04/11/20	15:10	Cachera	8.5	7.62	77.4	27.43	342	16	0	0.11	0.057			1.84	Cleo
04/11/20	16:07	Cachera	8.4	7.51	88.3	27.07	312	9 y 15	0	0.11	0.056			3.05	Cleo
04/11/20	17:25	Cachera	8.7	7.42	72.3	27.09	312	8	0	0.11	0.061		60	2.67	Cleo
05/11/20	8:53	Cachera	8.9	7.52	144.1	27.06	327	21	0	0.11	0.058			3.03	Marcos
05/11/20	14:30	Cachera	8.9	7.53	67.1	27.40	332	19	0	0.11	0.060			1.17	Marcos
05/11/20	15:10	Cachera	8.7	7.45	58.1	27.06	315	24	0	0.10	0.057			1.88	Marcos
05/11/20	15:36	Cachera	8.8	7.53	86.1	27.12	314	18	0	0.10	0.059			3.18	Marcos
05/11/20	15:55	Cachera	8.7	7.49	63.1	27.07	319	21	0	0.10	0.054	0.000	59	1.93	Cleo
05/11/20	17:47	Cachera	8.7	7.42	28.0	27.20	317	23	0	0.09	0.058			1.04	Cleo
06/11/20	10:17	Cachera	8.6	7.61	117.6	27.04	340	23	0	0.10	0.065			3.20	Marcos

*Referencia: Elaboración propia.*

	<b>Informe técnico</b>		Página <b>42</b> de <b>124</b>
	<b>CÓDIGO:</b> GTE-106-02-F3	<b>N° de Versión:</b> 01	

Del cuadro anterior, puede deducirse lo siguiente:

1. El valor de caudal fluctuó poco durante la prueba realizada, se mantuvo entre 8.4 y 9.0 L/s.
2. El valor de pH es cercano a 7.5.
3. Los valores de potencial redox (ORP) y de oxígeno disuelto (OD) son bajos, lo cual es de esperar para aguas subterráneas. Estas aguas tienden a ser aguas reductoras y sin presencia de oxígeno (anóxicas) y probablemente sin presencia de nitratos (anaeróbicas). Lo anterior está relacionada a la presencia de hierro y manganeso disuelto en el agua y de H<sub>2</sub>S.
4. El valor del parámetro de color es relativamente alto para ser aguas subterráneas. Este resultado puede estar ligado a la oxidación de metales como Fe y Mn, a la presencia de materia orgánica o a la oxidación de sulfuros a azufre elemental (sólido); podría ser una combinación de todo lo anterior. Adicionalmente, hay que tener presente que la medición es presuntiva con equipo de campo; el resultado oficial es el proporcionado por el LNA.
5. El valor de hierro fluctúa levemente al inicio de la prueba y luego se estabiliza cercano a 0.11 mg/L.
6. El valor de manganeso fluctúa poco y se encuentra en promedio cercano a 0.060 mg/L.
7. La concentración de aluminio en el agua es muy baja.
8. La concentración de sílice en el agua es cercana a 60 mg/L como SiO<sub>2</sub>.

Se realiza también una prueba de campo de demanda de cloro, lo anterior con el fin de poder determinar el punto de quiebre en el agua. Este punto, se refiere a la concentración de cloro donde al adicionar más de este desinfectante al agua este no se



consume o reacciona con otras sustancias, sino más bien aumenta proporcionalmente el cloro residual libre. Para realizar esta prueba, se prepara una solución de hipoclorito de sodio (NaOCl) con 350 ppm a partir de cloro comercial al 3.5%. Se seleccionan distintas concentraciones de NaOCl por adicionar al agua cruda y después de 30 minutos se determina el cloro residual libre con el equipo portátil marca Hach, modelo DR900. El pH del agua es 7.6 y la temperatura 27.05°C. Los resultados obtenidos se presentan en el cuadro 6.

**Cuadro 6. Prueba de demanda de cloro. Volumen de muestra: 50 mL.**

#	[NaOCl], mg/L agregado	Vol. solución (mL)	Cloro libre (mg Cl <sub>2</sub> /L)	Demanda cloro (mg Cl <sub>2</sub> /L)
1	3	0.43	0.11	2.89
2	4	0.57	0.15	3.85
3	4.5	0.64	0.12	4.38
4	5	0.71	0.11	4.89
5	5.5	0.79	0.22	5.28
6	6	0.86	0.17	5.83
7	7	1.00	0.10	6.9
8	8	1.14	0.10	7.9
9	9	1.29	0.37	8.63
10	10	1.43	0.79	9.21
11	11	1.57	1.24	9.76
12	12	1.71	1.68	10.32
13	13	1.86	2.14	10.86
14	14	2.00	2.78	11.22
15	15	2.14	2.84	12.16
16	16	2.29	3.42	12.58
17	17	2.43	3.52	13.48
18	18	2.57	3.8	14.2

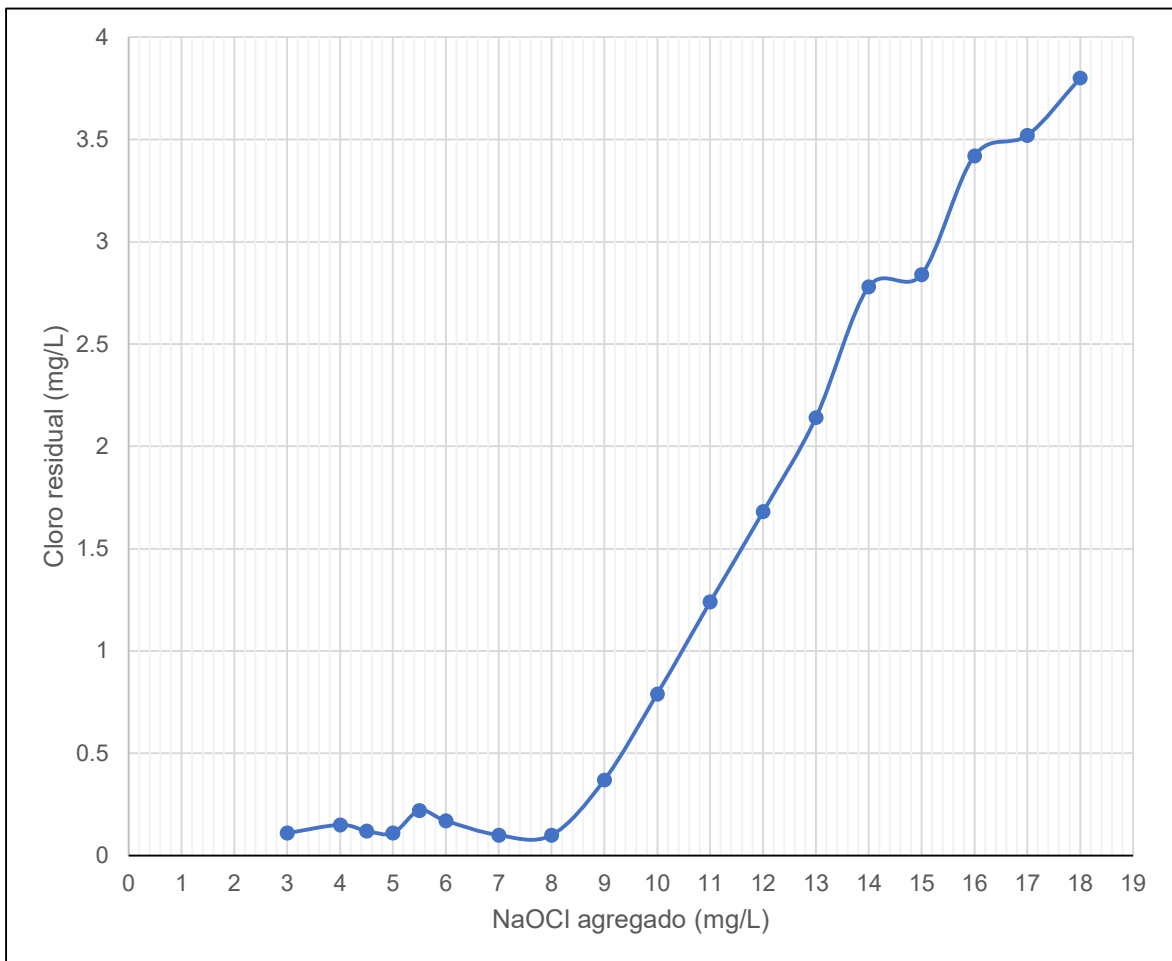
*Referencia: Elaboración propia*



Al graficar los datos de concentración de cloro residual libre contra NaOCl agregado se obtiene la curva de punto de quiebre mencionada, ver figura 5.

**Figura 5. Curva de punto de quiebre para muestra de agua analizada.**

**Condiciones: T = 27°C, pH=7.6 y T=30 min.**



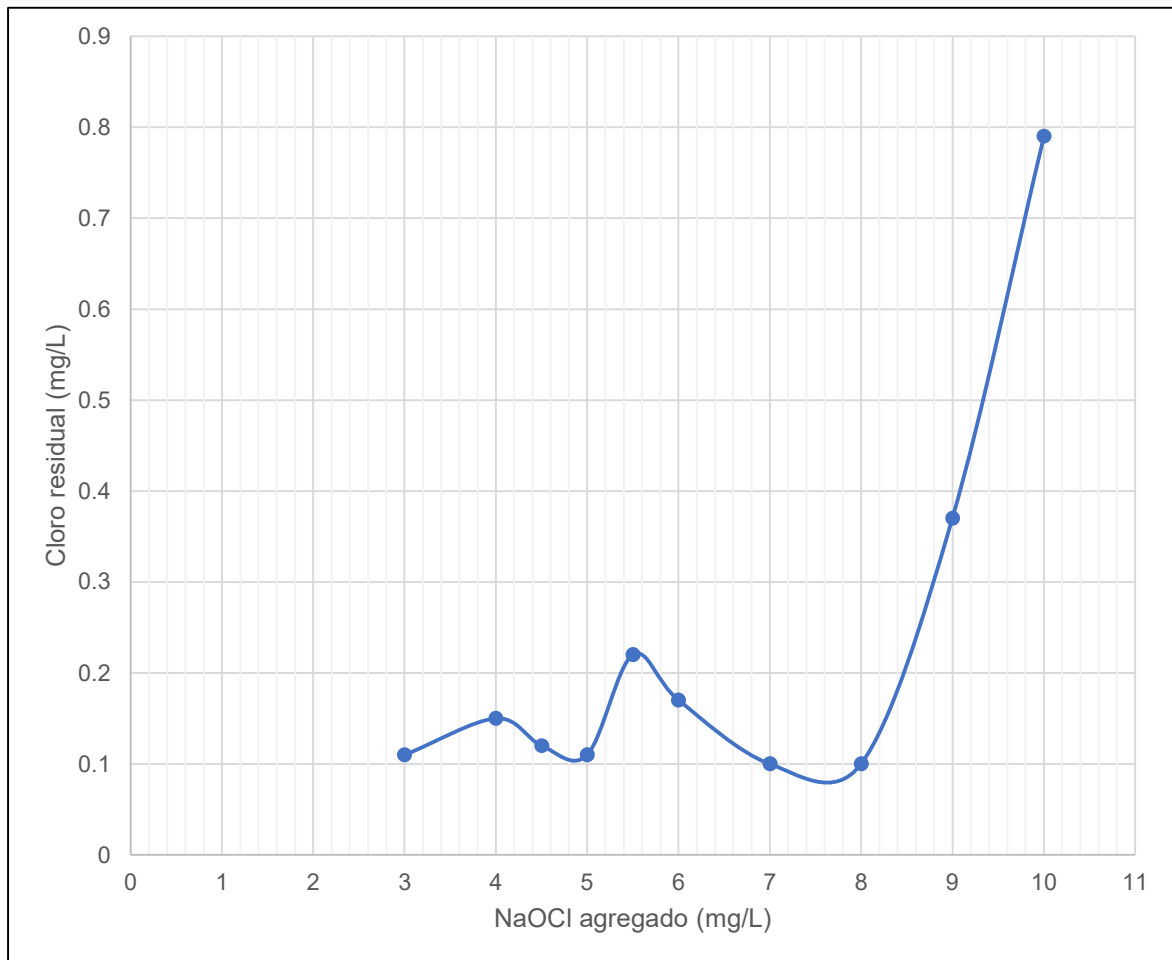
*Referencia: Elaboración propia.*

Como puede observarse, cuando la concentración de NaOCl agregada es cercana a 8 mg/L, al agregar más cloro, los valores de cloro residual libre aumentan de manera lineal; esto quiere decir que se ha superado el punto de quiebre. Si se toman los datos




hasta los 10 mg/L y los datos asociados de cloro residual libre, se obtiene la gráfica que se presenta en la figura 6.

**Figura 6. Curva de punto de quiebre para rango determinado.**



*Referencia: Elaboración propia.*

En la figura 6 se puede observar de mejor manera el punto de quiebre indicado, este se da a una concentración de NaOCl un poco menor a 8 mg/L; es decir, para poder obtener cloro residual libre en la muestra de agua analizada se requiere adicionar al menos 8 mg/L de NaOCl. Si se quisiera alcanzar un valor de 0.8 mg/L de cloro residual libre se requiere adicionar cerca de 10 mg/L de NaOCl. Estos resultados pueden ser

	<b>Informe técnico</b>		Página <b>46</b> de <b>124</b>
	<b>CÓDIGO:</b> GTE-106-02-F3	<b>N° de Versión:</b> 01	

útiles al seleccionar y dimensionar un sistema de cloración para este acueducto. Es importante mencionar que son resultados puntuales para la muestra de agua analizada y pueden variar si las condiciones del agua cambian.

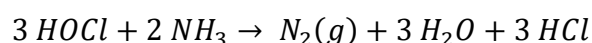
Mediante estequiometría se puede estimar teóricamente la cantidad de cloro requerida para oxidar los compuestos en el agua. De las pruebas y análisis de calidad de agua realizados, tenemos los siguientes datos de sustancias en el agua que pueden ser oxidadas utilizando cloro (ver cuadro 7).

**Cuadro 7. Algunos compuestos en el agua que pueden ser oxidados con cloro.**

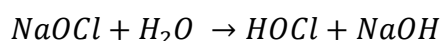
<b>Parámetro</b>	<b>Concentración (mg/L)</b>	<b>Fuente</b>
Hierro	0.13	LNA
Manganeso	0.06	LNA
Ácido sulfhídrico	0.02	Chemlabs
Amonio	1.6	AGQLabs

*Referencia: Elaboración propia.*

Según Crittenden (2012), el ácido hipocloroso (HOCl) puede oxidar el amonio o amoniaco a nitrógeno gaseoso o a nitrato; siendo la conversión a nitrógeno gaseoso la más comúnmente observada. La siguiente reacción describe lo mencionado:



Se puede deducir que se requieren 3 moles de HOCl por cada 2 moles de NH<sub>3</sub> (1.5 HOCl/NH<sub>3</sub>), y que se forma 1 mol de HOCl por cada mol de NaOCl agregado al agua (ver siguiente ecuación).



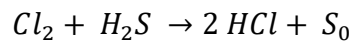
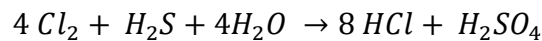
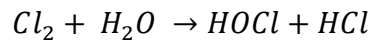
De lo anterior se puede obtener la cantidad de cloro requerida para oxidar 1.6 mg/L de amonio.



$$1.5 \frac{\text{mmol NaOCl}}{\text{mmol NH}_3} \times \frac{1 \text{ mmol NH}_3}{17 \text{ mg NH}_3} \times 1.6 \text{ mg} \frac{\text{NH}_3}{\text{L}} \times \frac{75 \text{ mg NaOCl}}{\text{mmol NaOCl}} = 10.6 \text{ mg NaOCl/L}$$

Como puede observarse, se requieren en teoría 10.6 mg/L de NaOCl para oxidar 1.6 mg/L de amonio a nitrógeno gaseoso.

Para el caso del ácido sulfhídrico, se pueden utilizar las siguientes reacciones:



De las ecuaciones anteriores, se puede deducir que el cloro puede oxidar al H<sub>2</sub>S hasta convertirlo en azufre elemental (sólido) o hasta convertirlo en sulfatos (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>). Si pensamos en pasar los sulfuros (S<sup>2-</sup>) a sulfatos, se puede estimar la cantidad de cloro requerida.

$$4 \frac{\text{mmol NaOCl}}{\text{mmol H}_2\text{S}} \times \frac{1 \text{ mmol H}_2\text{S}}{34 \text{ mg H}_2\text{S}} \times 0.02 \frac{\text{mg H}_2\text{S}}{\text{L}} \times \frac{75 \text{ mg NaOCl}}{\text{mmol NaOCl}} = 0.18 \text{ mg NaOCl/L}$$

Para el caso del hierro y manganeso, según Crittenden (2012) se requiere de 0.64 mgCl<sub>2</sub>/mgFe<sup>2+</sup> y de 1.29 mgCl<sub>2</sub>/mgMn<sup>2+</sup>. Dadas las concentraciones que tenemos en el agua (cuadro 7) se requiere de:

$$0.13 \frac{\text{mgFe}}{\text{L}} \times 0.64 \frac{\text{mgCl}_2}{\text{mgFe}} \times \frac{74 \text{ mg NaOCl}}{70 \text{ mg Cl}_2} = 0.088 \text{ mg NaOCl/L}$$

$$0.06 \frac{\text{mgMn}}{\text{L}} \times 1.29 \frac{\text{mgCl}_2}{\text{mgMn}} \times \frac{74 \text{ mg NaOCl}}{70 \text{ mg Cl}_2} = 0.082 \frac{\text{mgNaOCl}}{\text{L}}$$

Si se suman los requerimientos de cloro para oxidar estos compuestos se obtiene que se necesita de 10.85 mg NaOCl/L. Este valor es un poco superior al determinado



experimentalmente en la prueba de punto de quiebre (figura 6); se considera que esto es debido a que la concentración de amonio en el agua puede cambiar con respecto al tiempo y no se determinó para esa muestra de agua. Este valor de consumo de cloro no incluye los requerimientos de este oxidante con respecto a la posible materia orgánica presente en el agua.

Con los datos de demanda de cloro obtenidos experimentalmente, se procedió a realizar una prueba para ver si se formaban trihalometanos en el agua después de clorarla. Para esta prueba se tomaron dos muestras de agua y según los resultados de la figura 5 se agregaron aproximadamente 10.5 mg NaOCl/L; lo anterior para lograr obtener un valor de cloro residual libre después de un tiempo determinado cercano a 1 mg/L. Las muestras de agua se llevaron a analizar a un laboratorio privado; los resultados se presentan en el cuadro 8.

**Cuadro 8. Análisis de THM realizados.**

Parámetro	Muestra 1	Muestra 2	VMA – RCAP
Bromodiclorometano ( $\mu\text{g/L}$ )	15	17	60
Bromoformo ( $\mu\text{g/L}$ )	7.9	6.0	100
Cloroformo ( $\mu\text{g/L}$ )	45	60	200
Dibromoclorometano ( $\mu\text{g/L}$ )	10.3	13.1	100
Total ( $\mu\text{g/L}$ )	78.2	96.1	
Cloro residual libre (mg/L)	1.19	1.44	

*Referencia: N° A-20/126233-M1 y A-20/126235-M1*

Como puede observarse, se generaron THM; probablemente al reaccionar el cloro con la NOM presente en el agua. Es importante mencionar que, los valores obtenidos en estas muestras puntuales cumplen con el RCAP vigente en Costa Rica. Adicionalmente, respecto al cloro residual libre se puede notar que, el valor obtenido es un poco superior a 1 mg/L, lo anterior confirma los resultados de demanda de cloro obtenidos (figuras 5 y 6) y las estimaciones realizadas.



El día 06 de noviembre en horas de la mañana, antes de finalizar la prueba de 72 horas de bombeo continuo, se procedió a tomar muestras de aguas para analizar los mismos parámetros analizados en el Cuadro 4; con el fin de tener valores al inicio y final de la prueba.

#### Cuadro 8. Pruebas después de 72 horas de bombeo.

Parámetro	Valor	Unidades	Límite de cuantificación
Carbono orgánico disuelto	2.58	mg/L	1.00 mg/L
Carbono orgánico total	4.27	mg/L	1.00 mg/L
Hidrógeno sulfurado	<0.05	mg/L	0.05 mg/L
SUVA	1.94	L/mg*m	0.001 L/mg*m
UV <sub>254</sub>	0.050	cm <sup>-1</sup>	0.001 cm <sup>-1</sup>
COVs	2.92	µg/L	1.00

*Referencia: N° A-20/126231 AGQLabs (2020)*

Se analizaron algunos compuestos orgánicos volátiles (COVs), el valor que se presenta es la suma de los compuestos individuales analizados. Se determinaron 1,1,1 – Tricloroetano (1.6 µg/L) y 1,1 Dicloroetano SPCC (1.33 µg/L); la suma de estos da los 2.93 µg/L encontrados. De las sustancias determinadas, no se encontró ningún compuesto que excediera el VMA establecido en el RCAP.

Si se quiere analizar en conjunto los datos de COD, COT, UV<sub>254</sub> y SUVA de las determinaciones realizadas, se puede consolidar la información de los cuadros 2, 4 y 8 en uno sólo. En el cuadro 9 se presentan los datos consolidados para las determinaciones indirectas de NOM.

**Cuadro 9. Datos relacionados con materia orgánica en agua.**

Parámetro	07 setiembre	03 noviembre	06 noviembre
Carbono orgánico disuelto (mg/L)	5.35	2.09	2.58
Carbono orgánico total (mg/L)	5.70	2.46	4.27
SUVA (L/mg*m)	1.08	2.68	1.94
UV <sub>254</sub> (cm <sup>-1</sup> )	0.058	0.056	0.050

Referencia: AGQLabs

Si se analiza la información de este cuadro con lo mencionado en el apartado **3.3.3.1**, se tiene que los valores de TOC se encuentran entre 2.46 a 5.7 mg/L; a veces superiores a 4 mg/L y siempre superiores a 2 mg/L. Lo anterior indica que es posible que se genere la formación de THM y podría ser que en algunas ocasiones el total de THM sea superior a 100 µg/L. Adicionalmente, las determinaciones para el parámetro de SUVA se encuentran entre 1.08 y 2.68 L/mg\*m; al comparar estos resultados con lo indicado en la sección mencionada, se puede concluir que hay posibilidad de existencia de formación de THM.

Antes de finalizar la prueba de 72 horas de bombeo, se procedió a tomar muestras de agua para ser enviadas al LNA para que se realizaran análisis N1, N2 y N3 a las muestras de agua. De los análisis realizados por el LNA, en el cuadro 10 se presentan los parámetros físicos/químicos y su respectivo valor para los que salieron distintos a ND (No Detectable). El análisis completo se encuentra con el identificador: AYA-ID-07661-2020.

**Cuadro 10. Resumen de resultados de análisis realizado por LNA.**

Parámetro	Resultado
Alcalinidad (mg/L)	158
Amonio (mg/L)	Detectable
Calcio (mg/L)	14.7
Cloruros (mg/L)	6.63
Color Aparente (UPt-Co)	11



Parámetro	Resultado
Conductividad ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	309
Dureza de calcio ( $\text{mg}/\text{L}$ )	37
Dureza Total ( $\text{mg}/\text{L}$ )	90
Fluoruros ( $\text{mg}/\text{L}$ )	0.32
Hierro ( $\mu\text{g}/\text{L}$ )	133.7
Magnesio ( $\text{mg}/\text{L}$ )	13.0
Manganeso ( $\mu\text{g}/\text{L}$ )	60.0
Olor	Aceptable
pH	7.00
Potasio ( $\text{mg}/\text{L}$ )	9.2
Sodio ( $\text{mg}/\text{L}$ )	30.8
Turbiedad (UNT)	Detectable

Referencia: AYA-ID-07661-2020

Como puede observarse de este cuadro y al compararlo con los datos presuntivos realizados durante la visita al sitio (Cuadro 5), se puede notar que los datos son bastante similares; especialmente para los valores de hierro y manganeso. Se puede notar en el análisis del LNA que el valor de Color Aparente es de 11 UPt-Co, un valor cercano al VMA establecido en el RCAP (15 UPt-Co). Llama la atención que en el análisis del LNA el olor sale como Aceptable, pero es importante indicar que las personas que tomamos las muestras en sitio, notamos fácilmente un olor desagradable en el agua; tanto así que, en las observaciones de campo del análisis, se indica: “*Agua cruda con olor a huevo podrido o suampo. Muestra tomada después de 72 horas de funcionamiento del pozo*”.

Adicionalmente, es importante monitorear la concentración de potasio en el agua del pozo, en el análisis realizado se encuentra en 9.2 mg/L, valor muy cercano al VMA establecido en el RCAP. En los análisis del LNA se encuentra en 5.0 mg/L (AyA-ID-08037-2017) y en 8.3 mg/L (AyA-ID-07953-2018), lo que parece que ha aumentado con el tiempo; por lo que se recomienda se monitoree su concentración.



Debido a los problemas de color que se generan en el agua de este acueducto, la ASADA realiza una o dos veces al mes, una limpieza de las redes y tanques de almacenamiento. Por lo anterior, ha establecido varios puntos de purga de agua, en los cuales se abre una llave o se quita una tapa de la tubería y sale bastante agua durante algún tiempo; esta agua arrastra sedimentos que se encuentran dentro de la tubería y componentes del sistema. Durante la visita realizada se participó de una purga de las mencionadas y se tomó agua “sucia” para ser llevada al LNA y ver si era factible analizarla. Durante la purga el agua sale clara, luego se oscurece y finalmente se vuelve a aclarar. En la siguiente figura se observa una fotografía del agua que sale durante algún tiempo de la purga mencionada.



**Figura 7. Agua que sale durante la purga de las tuberías.**



*Referencia: Tomada de vídeo de María de Los Ángeles Abarca*

Como puede notarse en la foto, el agua sale oscura del sitio de purga en la red de distribución, se considera que esto es una evidencia de la queja de los abonados con



respecto al color del agua. Al mirar detenidamente esta agua, se le pudieron identificar partículas sólidas, que probablemente imparten color y turbiedad al agua. En el LNA se analizó la muestra de agua sucia con respecto a metales pesados. Para poder analizar la muestra, se debió realizar una digestión ácida y luego algunas diluciones. Los resultados obtenidos se presentan en el cuadro 11.


**Cuadro 11. Determinaciones para muestra de agua sucia, tomada el 06/11/20.**

**Sitio: purga cercana a caseta de pozo.**

<b>Metal</b>	<b>Concentración (µg/L)</b>
Aluminio	1 822
Silicio	32.6 (mg/L)
Cromo	1.2
Manganeso	966
Hierro	6 738
Níquel	3.4
Cobre	12.1
Zinc	316.3
Arsénico	N.D.
Selenio	N.D.
Cadmio	N.D.
Antimonio	N.D.
Mercurio	0.93
Plomo	3.4

*Referencia: Análisis de metales pesados, LNA.*

Como puede observarse de los datos reportados, las concentraciones de aluminio, hierro y manganeso se consideran elevadas. Este análisis puede ser una prueba de que el hierro y manganeso son parte de los responsables de impartir color al agua en el sistema de distribución. Se cree que aún y cuando las concentraciones de hierro (0.13 mg/L) y manganeso (0.06 mg/L) son menores a lo requerido por el RCAP, son suficientes para que bajo ciertas condiciones puedan formar parte de bio películas que se adhieren

	<b>Informe técnico</b>		Página <b>55</b> de <b>124</b>
	<b>CÓDIGO:</b> GTE-106-02-F3	<b>N° de Versión:</b> 01	

a las tuberías, tanques y accesorios en la red de distribución y en algunas situaciones se desprendan de estas obras y salgan en el agua que llega a los abonados del sistema.

De este grupo de análisis realizados, el 06 de noviembre 2020 se toma y preserva una muestra de agua cruda del pozo para ser analizada por H<sub>2</sub>S en otro laboratorio privado. Esto se realiza pues no se pudo detectar con el primer laboratorio la presencia de H<sub>2</sub>S en el agua. El resultado del análisis realizado se presenta en el cuadro 12.

#### **Cuadro 12. Análisis de H<sub>2</sub>S. Muestra preservada.**

Parámetro	Concentración (mg/L)	Límite de detección (mg/L)
Ácido sulfhídrico	0.020	0.007

*Referencia: CHEM-ID-08111-2020. Agua cruda pozo. Fecha muestreo: 06/11/20.*

Como puede observarse, se logra detectar H<sub>2</sub>S en este análisis para la muestra de agua. Se considera que esto se logra por dos razones:

1. La muestra de agua se preserva con acetato de zinc y NaOH según lo establece los Standard Methods para H<sub>2</sub>S.
2. El laboratorio que analiza la muestra tiene un límite de detección para H<sub>2</sub>S inferior al que realizó las determinaciones anteriormente.

Al comparar este valor de H<sub>2</sub>S con respecto al VMA establecido en el RCAP (0.05 mg/L) se nota que es menor al requerimiento del reglamento; es decir en este análisis se cumple la legislación con respecto a este parámetro. Como se mencionó en la sección **3.2.1** el umbral del olor para el ácido sulfhídrico es menor a 0.1 µg/L (0.0001 mg/L); por lo que se considera que el valor reportado en el análisis se puede relacionar al olor desagradable que se percibe en el pozo y las muestras de agua.

#### **3.7.4 Cuarto grupo de pruebas realizadas.**

El día 03 de diciembre 2020, la Ing<sup>a</sup> María de los Ángeles Abarca y el Ing. Marcos Anchía visitan la ASADA de Aguas Frías para realizar una prueba y posteriormente



analizar las muestras en un laboratorio privado. La prueba consistió en tomar una muestra de agua y preservarla con acetato de zinc y NaOH según lo establecido en los Standard Methods para determinación de sulfuros (4500-S<sup>2-</sup>).

Adicionalmente, se preparó una solución de NaOCl a 350 ppm, se tomó otra muestra de agua y se le adicionaron 10 mg/L de NaOCl. Se agitó y se esperó 30 minutos. Pasado este tiempo, se preservó la muestra con acetato de zinc y NaOH según lo indicado. La dosis de cloro agregada obedece a los resultados obtenidos de demanda de cloro y punto de quiebre para tratar de alcanzar un valor de cloro residual libre de 0.8 mg/L después de 30 minutos (figura 6).

Como se explicó anteriormente en este apartado, al oxidar el H<sub>2</sub>S con cloro se puede formar azufre elemental o H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. En este caso, se esperaba que en la primera muestra mencionada se detectara H<sub>2</sub>S y en la segunda no se detectara o su valor fuera inferior. Las pruebas se analizaron y los resultados obtenidos se presentan en el cuadro 13.


### Cuadro 13. Determinaciones de H<sub>2</sub>S para muestras de agua cruda y agua clorada.

Parámetro	Concentración (mg/L)	Límite de detección (mg/L)
Ácido sulfhídrico agua cruda, muestra preservada	0.010	0.007
Ácido sulfhídrico agua clorada, muestra preservada	< 0.007	0.007

Referencia: CHEM-ID-09283-2020 y CHEM-ID-09284-2020. Agua cruda pozo. Fecha muestreo: 03/12/20.

Como puede observarse, en la muestra de agua cruda (sin cloro) la concentración de H<sub>2</sub>S es de 10 µg/L y en la muestra clorada el valor no es detectable por el equipo y la prueba utilizada; los datos obtenidos concuerdan con lo esperado.

Durante la misma visita, se recolectaron muestras de agua de 5 puntos distintos de la red de distribución donde se realizan frecuentemente purgas para limpieza de las tuberías. Según indicó el fontanero de la ASADA, hacía aproximadamente 2 semanas se

	<b>Informe técnico</b>		Página <b>57</b> de <b>124</b>
	<b>CÓDIGO:</b> GTE-106-02-F3	<b>N° de Versión:</b> 01	

había realizado una de las limpiezas mencionadas. Se realizaron en el LNA análisis de turbiedad, color, pH y conductividad a las muestras tomadas. Los valores obtenidos se presentan en el cuadro 14.

**Cuadro 14. Resultados de análisis realizados a muestras de agua de purga.**

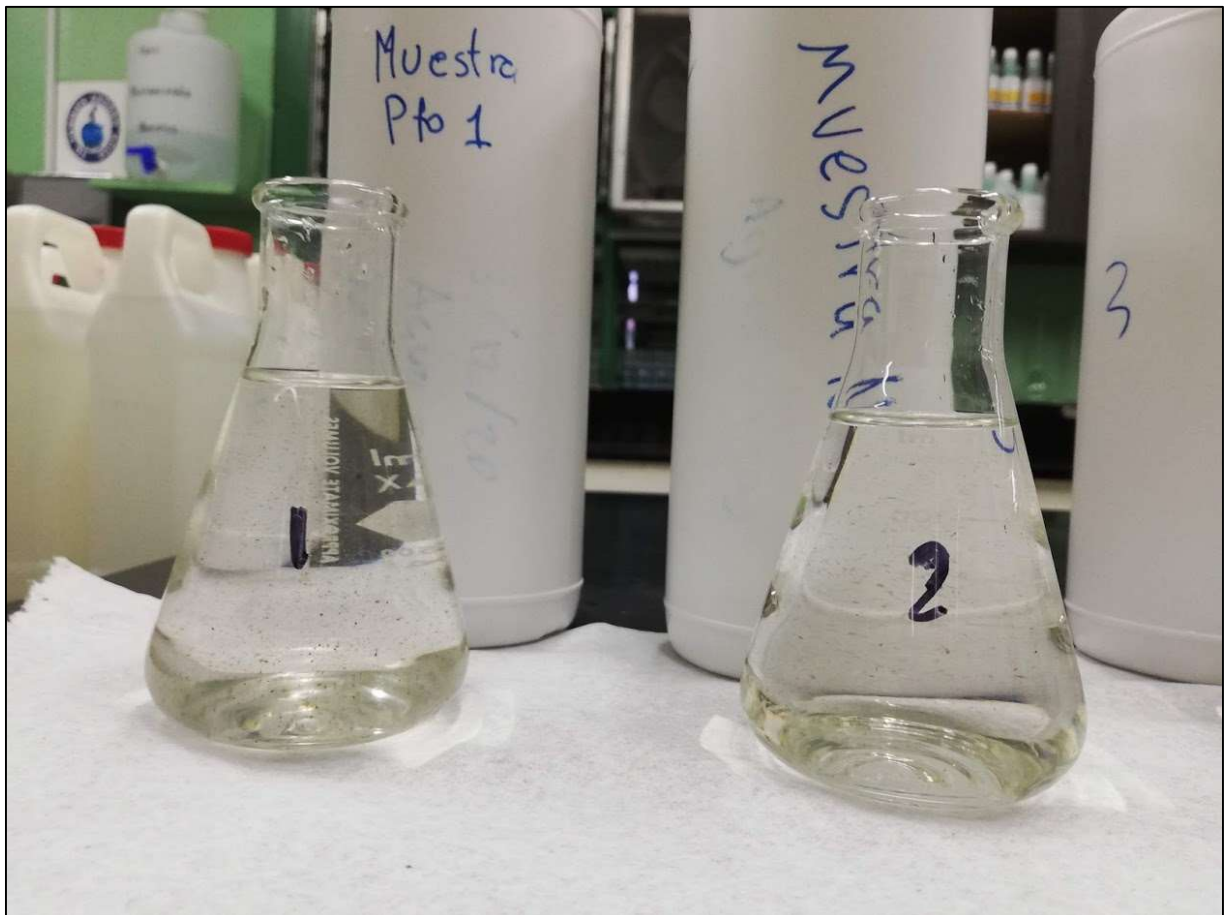
<b>Parámetro</b>	<b>Muestra 1</b>	<b>Muestra 2</b>	<b>Muestra 3</b>	<b>Muestra 4</b>	<b>Muestra 5</b>
Turbiedad (UNT)	3.82	2.14	3.36	20.1	3.91
Color (UPt-Co)	34	22	26	145	36
Conductividad ( $\mu$ S/cm)	300	299	299	303	303
pH	7.08	7.2	7.26	7.33	7.32

*Referencia: Ensayos realizados en LNA*

Como puede observarse los valores de Color Aparente en todas las muestras superan el VMA (15 UPt-Co); adicionalmente, en la muestra 4 la turbiedad es mayor al VMA (5 UNT). Se determinó la conductividad y el pH para determinar que el agua fuera siempre de la misma fuente, lo que se confirma con los datos obtenidos para estos parámetros. En las figuras 8, 9 y 10 se presentan fotografías de las muestras de agua analizadas.



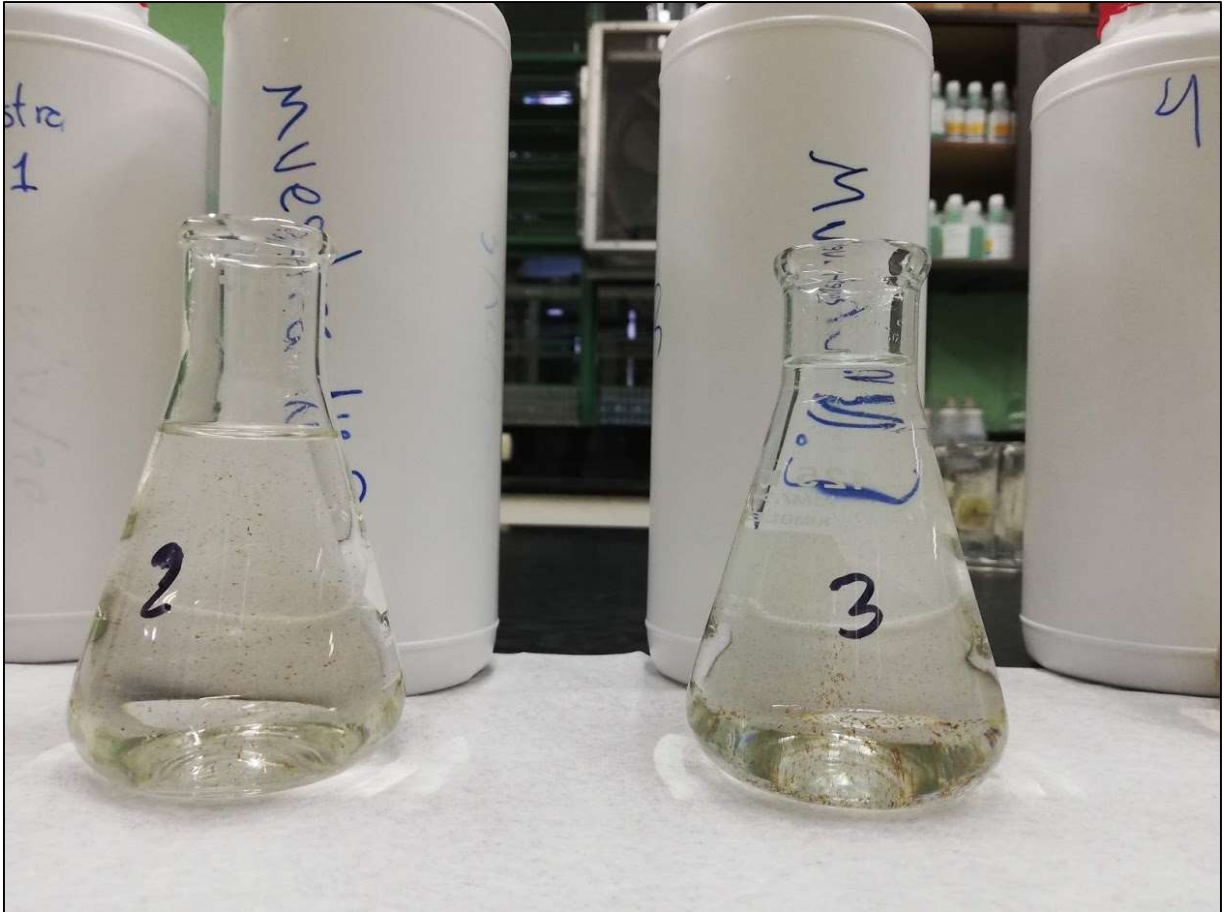
**Figura 8. Muestras 1 y 2 de agua sucia.**



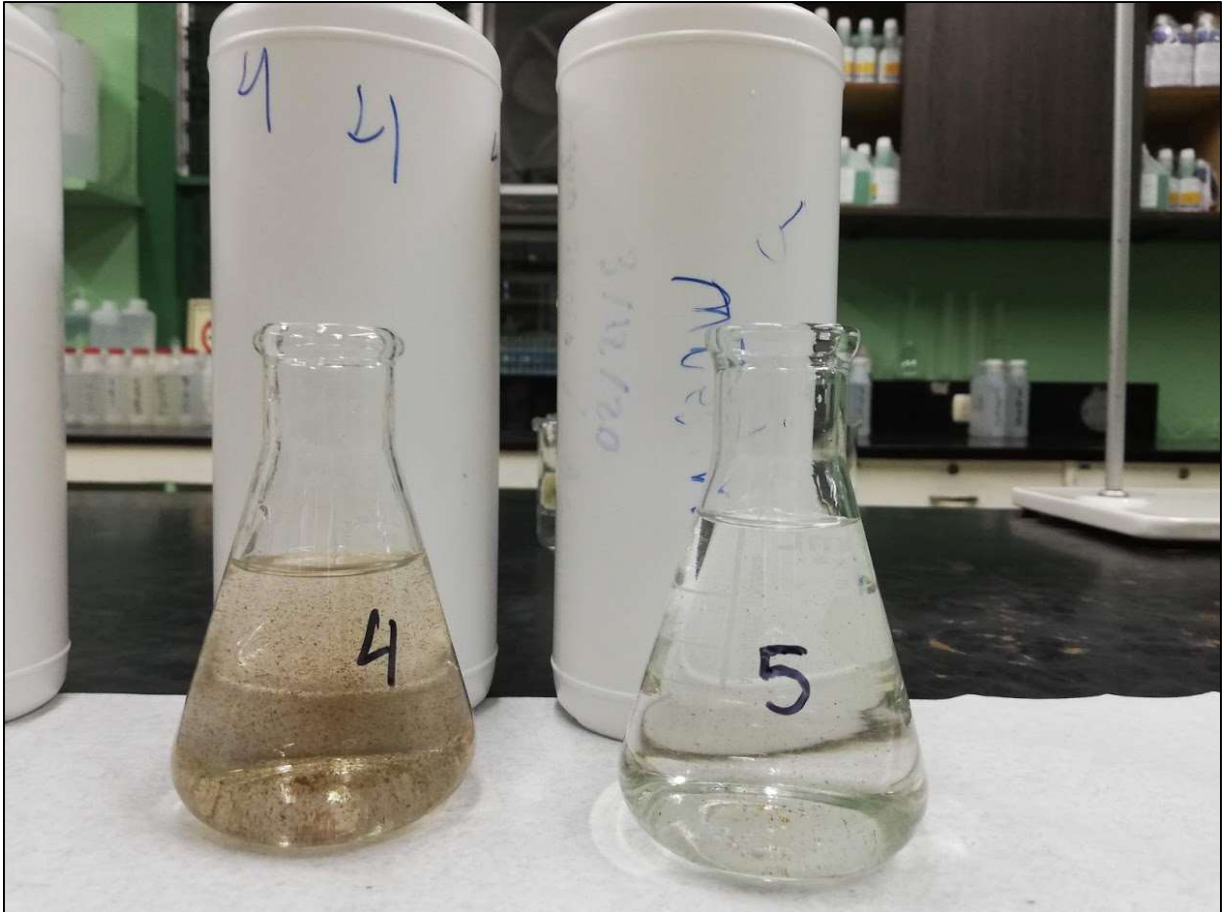
*Referencia: Fotografía del autor.*



**Figura 9. Muestras 2 y 3 de agua sucia.**



*Referencia: Fotografía del autor*

**Figura 10. Muestras 4 y 5 de agua sucia.**

*Referencia: Fotografía del autor.*

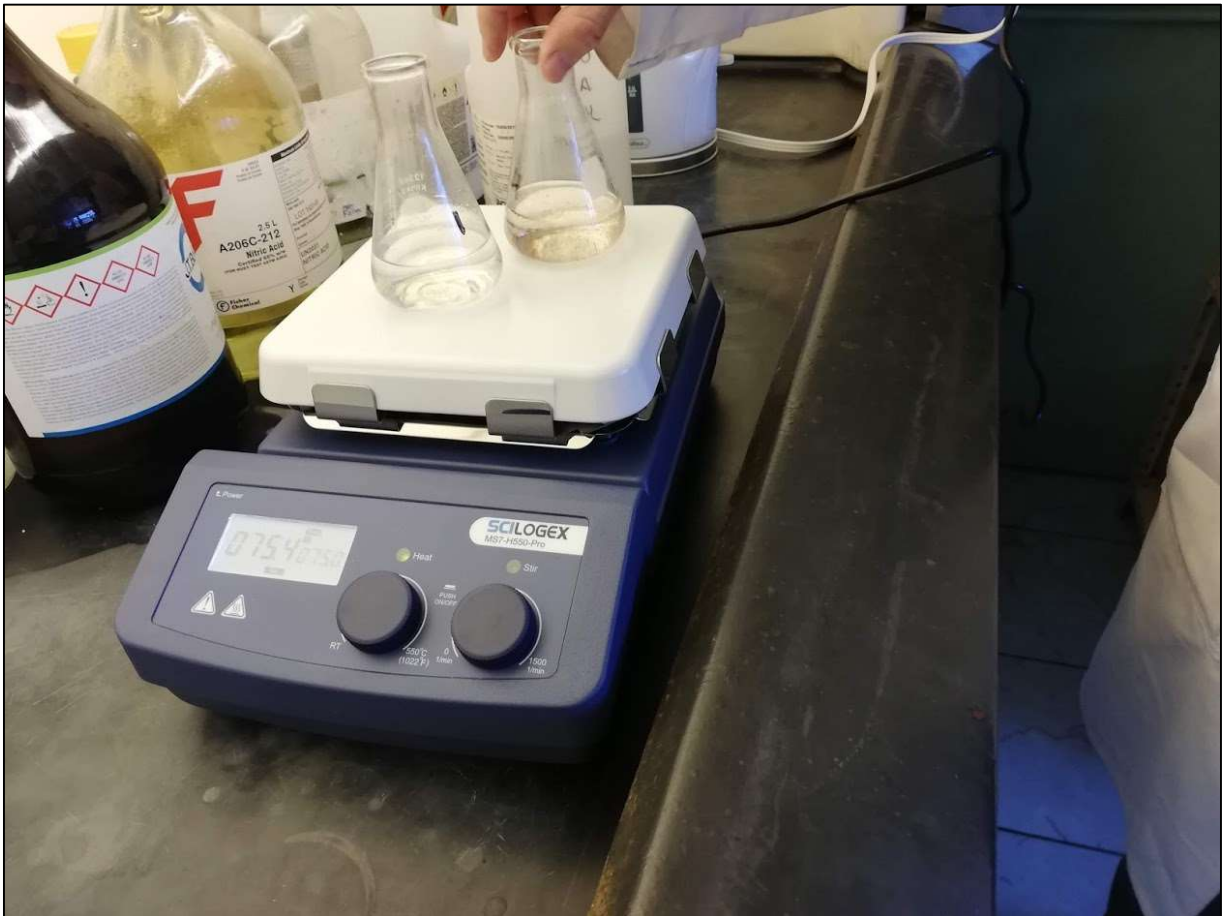
Como puede observarse de las fotografías mostradas, todas las muestras presentan turbiedad, color y sólidos suspendidos apreciables al ojo humano. La muestra 1 fue tomada en el sitio de purga cercano a la caseta del pozo (mismo del análisis cuadro 11) aproximadamente un mes después de tomada la primera. La muestra 4 fue la que presentó más turbiedad, color y sólidos en suspensión; se tomó en un sitio de purga cercano al tanque de almacenamiento.

Se seleccionaron las muestras 1 y 4 para realizar por LNA el análisis de metales pesados; este mismo análisis se le realizó al filtrado de la muestra 4. Para ello, se realizó



una digestión ácida en caliente a las muestras indicadas. En la figura 11 se presenta una fotografía del proceso de digestión mencionado.

**Figura 11. Fotografía del proceso de digestión.**



*Referencia: Fotografía del autor.*

Luego del proceso de digestión, las muestras se analizaron en uno de los equipos del LNA para determinar metales pesados. Los resultados obtenidos se presentan en el cuadro 15.

**Cuadro 15. Determinaciones de metales pesados para muestras de agua sucia.**

<b>Metal</b>	<b>Muestra 1</b>	<b>Muestra 4</b>	<b>Muestra 4 - filtrado</b>
Aluminio ( $\mu\text{g/L}$ )	200	2 260.5	N.D.
Silicio ( $\text{mg/L}$ )	25.5	30	33.8
Cromo ( $\mu\text{g/L}$ )	N.D.	N.D.	N.D.
Manganeso ( $\mu\text{g/L}$ )	441	3 442	7
Hierro ( $\mu\text{g/L}$ )	1 049.5	3 614.5	27.7
Níquel ( $\mu\text{g/L}$ )	N.D.	N.D.	N.D.
Cobre ( $\mu\text{g/L}$ )	N.D.	N.D.	N.D.
Zinc ( $\mu\text{g/L}$ )	200	201	1
Arsénico ( $\mu\text{g/L}$ )	N.D.	N.D.	N.D.
Selenio ( $\mu\text{g/L}$ )	N.D.	N.D.	N.D.
Cadmio ( $\mu\text{g/L}$ )	N.D.	N.D.	N.D.
Antimonio ( $\mu\text{g/L}$ )	N.D.	N.D.	N.D.
Mercurio ( $\mu\text{g/L}$ )	8.85	N.D.	N.D.
Plomo ( $\mu\text{g/L}$ )	N.D.	6	N.D.

*Referencia: Datos LNA.*

Como puede observarse de los análisis de metales pesados realizados a las muestras 1 y 4, las concentraciones de aluminio, hierro y manganeso exceden el RCAP y son elevadas. Estos valores refuerzan la hipótesis de que las quejas de los abonados respecto al color del agua están relacionadas con la presencia de hierro y manganeso; y posiblemente con la presencia de aluminio. Adicionalmente, al analizar los resultados obtenidos para el filtrado de la muestra 4, se puede deducir que el aluminio, hierro y manganeso presente en la muestra se encuentra mayoritariamente en su estado particulado; es decir no están solubles en el agua. La presencia de aluminio en las muestras estudiadas podría estar relacionada con el aporte de este elemento al agua por algún accesorio metálico en el sistema o por acumulación en la red por presencia natural del aluminio en el agua (aunque las concentraciones en el agua cruda son muy bajas).




De los datos de los cuadros 11 y 15, llama la atención la presencia de mercurio en las muestras del agua con sedimentos que se toma en algunos puntos de limpieza de la red. Según lo conversado con el químico David Cambronero del LNA, quien analizó las muestras, los valores de mercurio obtenidos en los análisis se pueden deber a que el envase donde se realizaron las digestiones para las muestras también es utilizado para hacer determinaciones de nitrógeno amoniacal. Esta última metodología utiliza un reactivo que contiene mercurio; por lo que se considera posible que sea por esta razón que aparece este elemento en las muestras de agua analizadas. Lo anterior, también se fundamenta en que las determinaciones realizadas para el agua del pozo con respecto a mercurio indican que su concentración es No Detectable (N.D.).

Según la OMS (2017) el mercurio se utiliza en la producción electrolítica del cloro, en accesorios eléctricos, en amalgamas dentales y como materia prima para varios compuestos de mercurio. Se indica que la comida es la principal fuente de mercurio para las poblaciones; con excepción de las expuestas por razones ocupacionales. Respecto a la ocurrencia, este metal se presenta en su forma inorgánica en aguas superficiales y subterráneas en concentraciones usualmente menor a 0.5 µg/L; sin embargo, depósitos minerales locales pueden producir valores superiores en aguas superficiales.

Según la EPA (2021), entre las fuentes que pueden contaminar las aguas para consumo humano se encuentran:

- Erosión de depósitos naturales.
- Descargas de refinerías y fábricas.
- Vertidos de rellenos sanitarios y tierras agrícolas.

Según Crittenden (2012) la presencia de mercurio en las fuentes de agua es un indicador de contaminación por minería, industria o trabajos metalúrgicos. Por tanto, de

	<b>Informe técnico</b>		Página <b>64</b> de <b>124</b>
	<b>CÓDIGO:</b> GTE-106-02-F3	<b>N° de Versión:</b> 01	

la información revisada, no se encuentra relación entre la presencia de mercurio en agua y accesorios como válvulas y conexiones en los sistemas de abastecimiento de agua.

Por las anteriores razones, se recomienda a la Subgerencia de Sistemas Delegados, coordinar con el LNA para realizar de nuevo un muestreo y análisis de las aguas sucias de la limpieza de las redes en los puntos antes mencionados, especialmente en el que la muestra mostró presencia de mercurio. Lo anterior, debe coordinarse con el LNA para que cuando se realicen las determinaciones, no se utilicen envases que hayan sido utilizados para las determinaciones de nitrógeno amoniacal.

De las determinaciones que se presentan en los cuadros 11 y 15 se puede observar la presencia de Silicio y las determinaciones presuntivas que se muestran en el cuadro 5 se muestra el valor de Sílice para el agua cruda. Los valores de las determinaciones del LNA y presuntivas realizadas difieren porque en el caso de las realizadas por el LNA se expresan como mg/L de Si y las presuntivas (cuadro 5) como mg/L de SiO<sub>2</sub>.

### **3.8 Sistema de tratamiento del agua.**

Para mejorar la calidad del agua del sistema de abastecimiento de la ASADA de Aguas Frías, primero se identifican las afectaciones objeto de estudio:

1. Olor.
2. Color.
3. Amonio. En algunas determinaciones se excede el VMA establecido en el RCAP.
4. Consumo de cloro.

Seguidamente, se relacionan las afectaciones a la calidad del agua con parámetros o contaminantes específicos. A continuación, se presentan las relaciones mencionadas:



1. Olor. Posible presencia de  $H_2S$  en el agua, producto del proceso metabólico de ciertos microorganismos.
2. Color. Óxidos de hierro y manganeso en la red de distribución y/o presencia de NOM en el agua.
3. Consumo de cloro. Existe una demanda o consumo de cloro por parte de sustancias o compuestos reducidos como: amonio,  $H_2S$ , NOM, hierro y manganeso.

Como puede observarse, la oxidación de las especies reducidas más un proceso de filtración, podría ser una posible alternativa para el tratamiento del agua en este acueducto. Sin embargo, la presencia de NOM en el agua puede reaccionar con oxidantes como el cloro para formar subproductos de la desinfección, como lo son los THMs.

Adicionalmente, es importante mencionar que de los datos con que se cuenta sobre análisis de calidad del agua del pozo de la ASADA, la concentración de potasio ha mostrado un ligero incremento con el pasar del tiempo; desde valores de 5.0 mg/L hasta 9.2 mg/L; este último muy cercano al VMA.

Tomando en consideración los aspectos antes mencionados, se proponen dos posibles sistemas de tratamiento del agua; uno a través del uso de medios granulares y otro mediante membranas. A continuación, se presentan los mismos.

### **3.8.1 Procesos de potabilización mediante medios granulares.**

Se refiere a la utilización de materiales granulares dentro del proceso con el fin de remover los contaminantes del agua. Para esta alternativa de potabilización, se debe considerar incluir al menos los siguientes detalles.

Línea de potabilización.



1. Extracción de agua del pozo.
2. Remoción de sólidos particulados y sólidos en suspensión (arenas y otros).
3. Adsorción en carbón activado granular (GAC) para remoción de NOM.
4. Oxidación de  $H_2S$ , amonio, hierro y manganeso mediante la aplicación de cloro.
5. Filtración en medio catalítico a base de dióxido de manganeso ( $MnO_2$ ).
6. Desinfección.
7. Cisterna para reducir la carga hidráulica sobre el sistema de tratamiento y para dar tiempo de contacto del cloro con el agua (por la presencia de amonio y para la desinfección).
8. Rebombeo a tanque de almacenamiento.

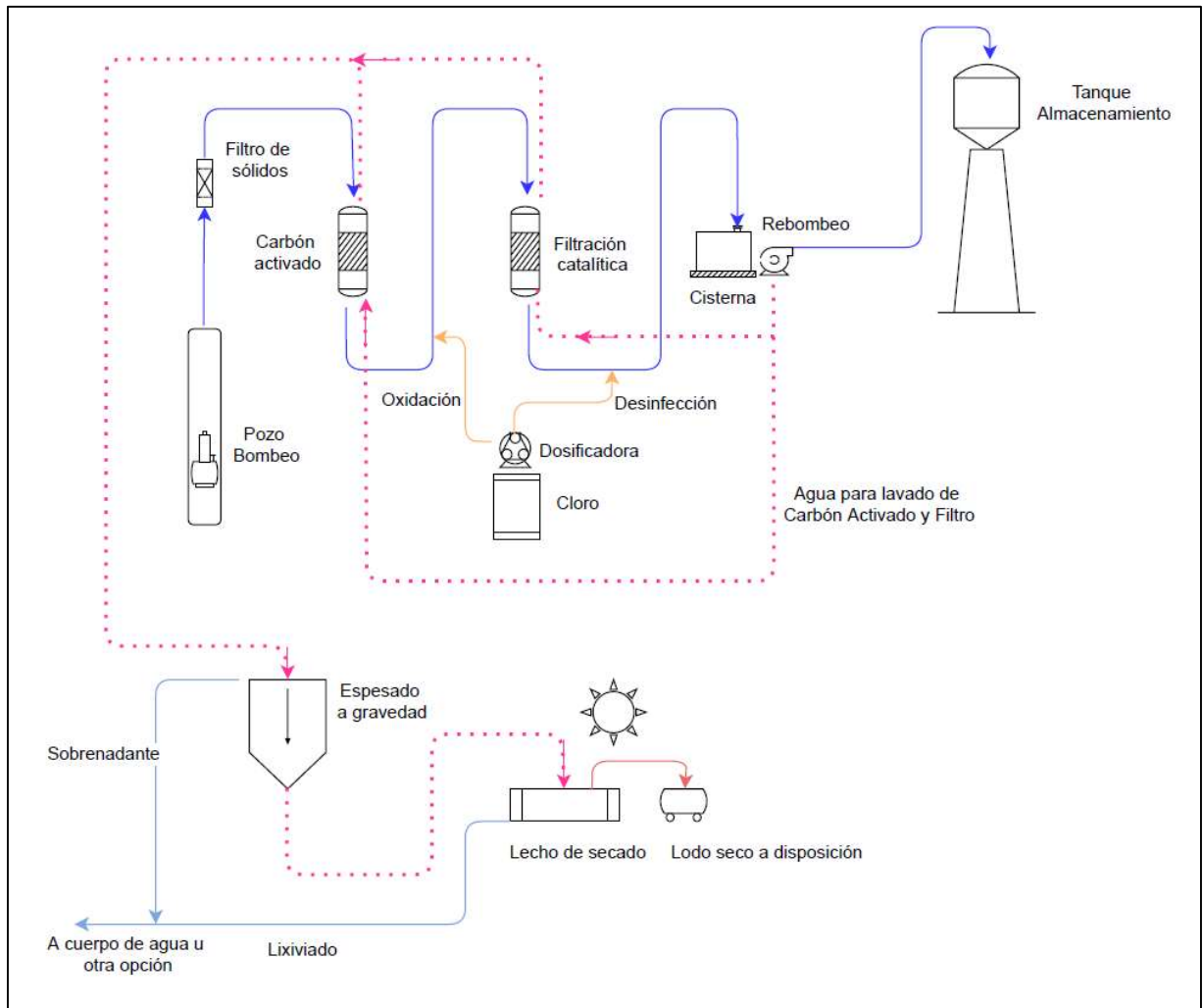
Línea de gestión de aguas residuales del proceso de potabilización.

1. Espesado a gravedad.
2. Deshidratado de lodo en lechos de secado.

Es importante indicar que el aluminio no es un contaminante meta para remover en este sistema de potabilización; lo anterior debido a que en los análisis de calidad del agua cruda del pozo la concentración de aluminio es muy baja o N.D. Si esta sustancia se encontrara en el agua de forma particulada (sólida) es muy probable que quede retenida en el sistema de adsorción o en el de filtración. En la figura 12 se presenta un esquema de la propuesta mencionada.



Figura 12. Esquema de tratamiento propuesto.



Referencia: Elaboración propia.



Como puede observarse de la figura 12 y como se mencionó anteriormente, con el fin de minimizar la posibilidad de formar subproductos de la desinfección (THMs y otros) se procederá a remover la NOM antes de aplicar un oxidante, esto se realizaría a través del uso de un adsorbente como el carbón activado granular (GAC). Posteriormente, utilizando cloro como oxidante, se oxidará el amonio,  $H_2S$ , el hierro y manganeso. Para el caso del amonio se espera que se forme mayoritariamente nitrógeno gaseoso o nitratos, en el caso del  $H_2S$  se espera se forme principalmente azufre elemental (sólido) o sulfatos (soluble) y para el caso del hierro y manganeso se formarán hidróxido férrico (sólido) y dióxido de manganeso (sólido). Los sólidos particulados que posiblemente se formarán serán removidos mediante un sistema de filtración catalítica; en este último, para el caso del hierro y manganeso se podrá dar un fenómeno de adsorción seguido del proceso catalítico de oxidación mediante el  $MnO_2$  del medio utilizado.

Con el paso del agua a través del carbón activado y del filtro de  $MnO_2$ , se irán depositando partículas en la superficie de los medios; así como una especie de distribución heterogénea del material adsorbente y filtrante; lo que puede afectar los procesos de tratamiento. Transcurrido un tiempo determinado (o una cantidad de agua tratada) se deberá realizar una limpieza y reacomodo de los medios mencionados. Esta limpieza se hará pasando agua tratada en dirección contracorriente (ascendente), a una tasa de lavado determinada, este proceso se llama retrolavado.

Los retrolavados generarán aguas residuales con sólidos particulados, las cuales pasarán a unos tanques de espesado o clarificadores. Después de un tiempo dentro de estas estructuras, las partículas se asentarán en el fondo cónico de las mismas. Mediante una válvula se podrán purgar los clarificadores y el lodo espeso en ellos será enviado a lechos de secado para su deshidratado. Una vez deshidratado, este lodo deberá ser dispuesto según las regulaciones nacionales aplicables (posiblemente puede ser enviado a un relleno sanitario).



El sobrenadante de los espesadores o clarificadores debe evaluarse, en caso de que cumpla con las regulaciones nacionales vigentes (Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales) podrá ser dispuesto en un cuerpo de agua cercano. Lo mismo aplica para el caso de los lixiviados que se generan en los lechos de secado. Lo anterior, implica la elaboración de Reportes Operacionales y su presentación ante el Ministerio de Salud (MINSA); así como la realización de los trámites asociados para obtener los permisos de vertido, permiso de ubicación y visado (plataforma APC del CFIA).

### 3.8.1.1 Filtro para sólidos

Debido a la construcción de los pozos y el sistema de bombeo utilizado, en algunas ocasiones el agua impulsada contiene partículas sólidas (arena, etc) que pueden acumularse en los procesos de tratamiento del agua y afectarlos. Por esta razón, se recomienda colocar un filtro en línea que permita remover estos sólidos. Estos filtros pueden remover partículas con tamaños que varían desde 1 micrómetro hasta 1000 micras. Un ejemplo de un filtro como el mencionado, es el que se encuentra colocado en el sistema de tratamiento de agua para consumo de la ASADA de Anabán; es un filtro de malla automático (autolimpiante). En la figura 13 se presenta el filtro mencionado de la ASADA de Anabán.

**Figura 13. Filtro de malla autolimpiante.**

*Referencia: Fotografía tomada por el autor. (2020).*

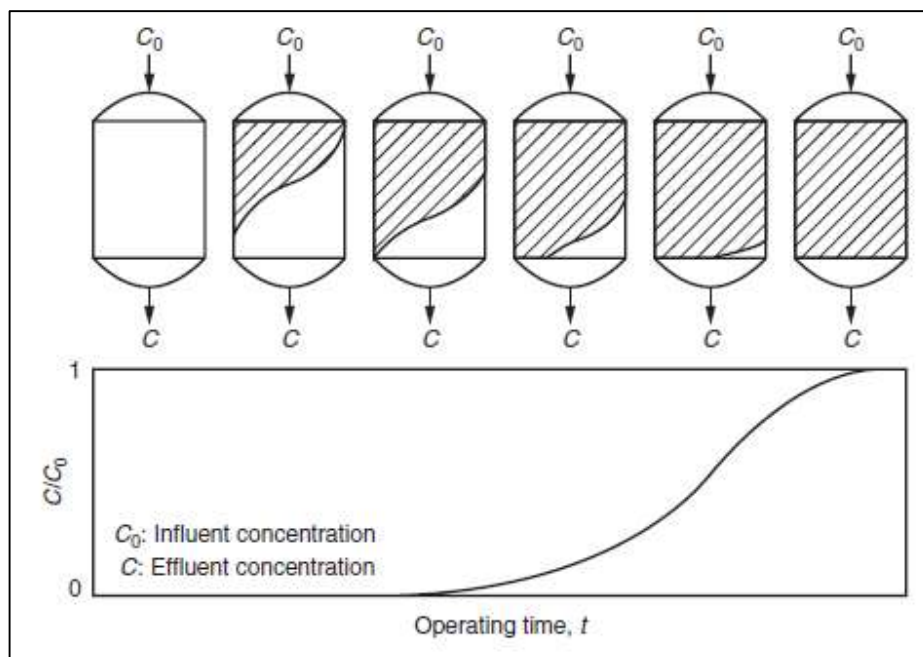
### **3.8.1.2 Adsorción sobre carbón activado granular.**

Para remover la NOM del agua y debido a que se trata de agua subterránea que debe ser bombeada a la superficie, se propone el uso de sistemas de adsorción con carbón activado granular (GAC) presurizados. La adsorción es una operación de transferencia de masa en la cual sustancias presentes en la fase líquida (adsorbato) son adsorbidas o acumuladas en una fase sólida (adsorbente), y por ende removidas del líquido.

Con el paso del tiempo y del agua a través del material adsorbente, los contaminantes (adsorbato) quedan acumulados en los poros (fase sólida) del adsorbente. Se crea entonces una zona de transferencia de masa (MTZ) en el medio adsorbente, la cual avanza en la dirección del flujo de agua, misma que limita la zona de medio agotado (sin

más capacidad de remover contaminantes) y medio con capacidad de remover la sustancia objetivo. Una vez el medio se satura por completo, la concentración del contaminante en el agua afluente es igual a la del agua efluente. En la figura 14 se presenta una imagen que describe lo expuesto.

**Figura 14. Perfil de saturación de medio adsorbente y curva de ruptura.**



*Referencia: Crittenden (2012).*

Se presenta adicionalmente en la figura 14, lo que se denomina curva de ruptura de un material adsorbente. Como puede verse, al inicio de la operación del sistema de tratamiento la concentración efluente del contaminante es cero o despreciable. Con el paso del tiempo, la zona de transferencia de masa avanza a través del medio adsorbente y la concentración efluente del contaminante aumenta. Finalmente, cuando la concentración efluente del contaminante es igual a la afluente, el medio se encuentra saturado. Es importante indicar que, en muchos casos la concentración meta efluente del contaminante es inferior a la afluente, por lo que la vida útil del medio adsorbente no queda limitada hasta llegar a agotar su capacidad por completo.



El tiempo de contacto de cama vacía (EBCT, empty bed contact time), se refiere al volumen ocupado por el adsorbente dividido por el caudal.

$$EBCT = \frac{V_m}{Q}$$

La velocidad de paso del agua a través del medio adsorbente se expresa como la relación entre el caudal y el área superficial.

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

Según EPA (1996), para realizar investigaciones donde se utiliza el carbón activado granular para remover precursores de Subproductos de la Desinfección, se recomienda que el EBCT se encuentre entre 10 y 20 minutos. Adicionalmente, se recomienda que la velocidad o tasa de filtración para este propósito se encuentre entre los 5 a 15 m/h. Con estos datos base, se procede a realizar un dimensionamiento preliminar del sistema de adsorción por GAC. Utilizando un caudal de 6.7 L/s (estimación de consumo para un horizonte de 20 años, realizada por el área de Administración de Proyectos de la Subgerencia de Sistemas Delegados), se obtienen las dimensiones que se presentan en el cuadro 16.

**Cuadro 16. Datos base y resultados preliminares obtenidos para la etapa de GAC.**

Parámetro	Resultado	Unidades
Caudal	6.7	L/s
Caudal	24.12	m <sup>3</sup> /h
N° de tanques en paralelo	3	Unidades
Velocidad de flujo	5.3	m/h
EBCT	14	min
Caudal/tanque	8.04	m <sup>3</sup> /h
Área superficial/tanque	1.5	m <sup>2</sup>
Diámetro	1.39	m



Parámetro	Resultado	Unidades
h medio	1.24	m
Vol. medio/tanque	1.88	m <sup>3</sup>
Vol. medio/tanque	66.2	ft <sup>3</sup>

*Referencia: Elaboración propia.*

Como puede observarse, se propone el uso de tres tanques presurizados en paralelo (el flujo se divide en tres), con un diámetro de 1.39 m. Este valor se obtiene al fijar la velocidad de flujo entre los valores recomendados (5 a 15 m/h). Con este diámetro y evaluando distintos EBCT (dentro de los valores recomendados), se logra obtener una altura de medio adsorbente (GAC) que no sea demasiado grande; el valor de altura de medio propuesto es de 1.24 m para un EBCT de 14 min. Estos valores se obtienen de realizar varias corridas y tratando de ajustar los resultados con dimensiones comerciales para los tanques presurizados. Se propone el uso de tres tanques de 55" x 86" (diámetro, altura); obtenidos del catálogo comercial de una empresa (Pure Aqua Inc).

Es importante mencionar que la vida útil del GAC y su capacidad para remover la NOM (precursor de SPD) debe ser evaluada mediante pruebas a escala, ya sean pruebas piloto o pruebas rápidas de columna a pequeña escala (Rapid Small Scale Column Tests – RSSCT). Lo anterior, permitirá estimar de mejor manera la vida útil del adsorbente y determinar los parámetros de diseño como lo son el EBCT y la velocidad de flujo. Los valores utilizados anteriormente, son solamente para tener un estimado inicial del sistema de tratamiento. Se conoce que el Instituto Tecnológico de Costa Rica cuenta con equipamiento para realizar este tipo de pruebas (RSSCT).

### 3.8.1.3 Oxidación mediante el uso de cloro.

Luego de la remoción de NOM mediante el uso de GAC, se procede a realizar la dosificación de cloro en línea como oxidante para el Fe, Mn, H<sub>2</sub>S y el NH<sub>4</sub><sup>+</sup>. Como se mencionó anteriormente, el Fe y Mn al oxidarse forman óxidos metálicos (sólidos en suspensión) que deben ser eliminados mediante la filtración del agua.



### 3.8.1.4 Filtración catalítica en MnO<sub>2</sub>.


Para la remoción de hierro y manganeso y cualquier sólido particulado que pueda formarse (por ejemplo, azufre elemental) luego de la oxidación con cloro, se propone el uso de un sistema de filtración presurizada. Se realizará con tanques en paralelo (caudal se divide) y utilizará como medio filtrante una arena o zeolita recubierta con MnO<sub>2</sub> (material catalítico). Para estos procesos, según las fichas técnicas de los fabricantes de medios filtrantes y la experiencia adquirida, la velocidad de paso del agua a través de los materiales debe ser cercana a los 10 m/h y el EBCT superior a los 3 minutos. Utilizando una velocidad de paso de 10 m/h y un EBCT de 6 minutos, se obtienen los valores que se presentan en el cuadro 17.

**Cuadro 17. Datos base y resultados preliminares para la filtración en MnO<sub>2</sub>.**

Parámetro	Resultado	Unidades
Caudal	6.7	L/s
Caudal	24.12	m <sup>3</sup> /h
N° de tanques en paralelo	2	Unidades
Velocidad de flujo	10	m/h
EBCT	6	min
Caudal/tanque	12.06	m <sup>3</sup> /h
Área superficial/tanque	1.2	m <sup>2</sup>
Diámetro	1.2	m
h medio	1.0	m
Vol. medio/tanque	1.21	m <sup>3</sup>
Vol. medio/tanque	42.6	ft <sup>3</sup>

*Referencia: Elaboración propia.*

Como puede observarse, se propone el uso de 2 tanques presurizados en paralelo (el flujo se divide en 2), con un diámetro de 1.2 m. Este valor se obtiene al fijar la velocidad de flujo entre los valores recomendados y la experiencia adquirida. Con este diámetro y evaluando distintos EBCT (dentro de los valores recomendados), se logra obtener una


	<b>Informe técnico</b>		Página <b>75</b> de <b>124</b>
	<b>CÓDIGO:</b> GTE-106-02-F3	<b>N° de Versión:</b> 01	

altura de medio catalítico ( $MnO_2$ ) aceptable; el valor de altura de medio propuesto es de 1.0 m para un EBCT de 6 min. Estos valores se obtienen de realizar varias corridas y tratando de ajustar los resultados con dimensiones comerciales para los tanques presurizados. Se propone el uso de dos tanques de 48" x 72" (diámetro, altura); obtenidos del catálogo comercial de una empresa (Pure Aqua Inc).

### **3.8.1.5 Desinfección y tiempo de contacto.**

Luego del proceso de filtración, se propone la adición de cloro al agua para terminar de oxidar cualquier sustancia que pudiese haber quedado reducida y, además, que sirva para la desinfección de esta. Debido a que el amonio requiere de una importante cantidad de oxidante y además de tiempo de contacto para pasar a formar nitratos o nitrógeno gaseoso y que, además, se debe contemplar un tiempo de contacto del cloro con el agua para lograr la desinfección, se propone para esto utilizar una cisterna de agua tratada. Esta obra, además servirá para contar con un volumen de agua tratada suficiente para realizar el lavado de uno de los tanques presurizados anteriormente mencionados.

Por las anteriores razones, se recomienda diseñar una cisterna de agua tratada donde el agua pueda permanecer al menos 30 minutos. La selección de este tiempo se realiza según lo indicado por el químico del LNA Luis Zúñiga, para unas pruebas realizadas por ellos donde se oxidó el amonio (30 minutos) y según las recomendaciones de CEPIS (2005) para el proceso de desinfección (mayor a 20 minutos). Para cumplir con los requerimientos anteriormente mencionados y contar con suficiente agua tratada para hacer el lavado de los tanques presurizados de GAC ( $16.1 \text{ m}^3/\text{tanque}$ ) ó de  $MnO_2$  ( $9.8 \text{ m}^3/\text{tanque} \times 2 \text{ tanques}$ ), se debe utilizar un tiempo de residencia del agua en la cisterna de al menos 50 minutos. Con este tiempo y un caudal de 6.7 L/s, se requiere de un volumen de la estructura de aproximadamente  $20 \text{ m}^3$ . A manera de ejemplo, se puede utilizar una estructura cuadrada de 3 m de lado por 2.5 m de altura.

	<b>Informe técnico</b>		Página <b>76</b> de <b>124</b>
	<b>CÓDIGO:</b> GTE-106-02-F3	<b>N° de Versión:</b> 01	

### 3.8.1.6 Gestión de residuos.

El GAC aún y cuando no se destinará a ser utilizado como un filtro, sino más bien como un adsorbente, va a retener partículas en suspensión que vengan en el agua. Con el paso del tiempo, se van a ir acumulando estos sólidos en el medio y va a aumentar el diferencial de presión existente entre el agua afluyente y efluente en los tanques presurizados. Adicionalmente, con el paso del agua, el medio adsorbente se va a ir compactando y se podrán crear canales preferentes por donde podría pasar el agua sin ser tratada. Por estas razones, el GAC se debe de retrolavar.

Según recomendaciones de fabricantes de GAC (Calgon, 2021), se recomienda utilizar una tasa de lavado del material entre 8 a 15 gpm/ft<sup>2</sup> y un tiempo de lavado entre 10 a 20 minutos. Adicionalmente, se debe realizar un enjuague del medio de aproximadamente 5 a 10 minutos. En el cuadro 18 se presentan los datos utilizados y la estimación de residuos generados por el lavado del GAC.

**Cuadro 18. Residuos producidos del lavado del GAC.**

<b>Parámetro</b>	<b>Resultado</b>	<b>Unidades</b>
Velocidad retrolavado	12	gpm/ft <sup>2</sup>
Velocidad retrolavado	29.3	m/h
Tiempo de lavado	20	min
Tiempo de enjuague	10	min
Temperatura agua	30	°C
Temperatura agua	86	°F
Expansión del medio	20	%
# tanques a lavar simultáneos	1	Unidad
Volumen retrolavado/tanque	14.8	m <sup>3</sup> /tanque
Volumen de enjuague/tanque	1.3	m <sup>3</sup> /tanque
Frecuencia de lavado	7 a 15	días
Caudal necesario para lavado	12.34	L/s

*Referencia: Elaboración propia.*



Como puede observarse, se utiliza una velocidad de lavado de 12 gpm/ft<sup>2</sup> y un tiempo de lavado de 20 minutos; adicionalmente, se propone realizar un enjuague posterior a una velocidad de 5.3 m/h (de operación normal) durante 10 minutos. Al realizar este proceso de lavado para un tanque presurizado que contiene GAC, se generan aproximadamente 14.8 m<sup>3</sup> de retrolavado y 1.3 m<sup>3</sup> de enjuague, para un total de 16.1 m<sup>3</sup>. Como puede observarse, este valor coincide con el volumen de la cisterna de agua tratada. Es importante mencionar, que se estima que el requerimiento de lavado del GAC será de cada 7 a 15 días de operación continua.

Con respecto a los lavados del material filtrante (MnO<sub>2</sub>), según las recomendaciones de los fabricantes, para una temperatura de 30°C y una expansión deseada del medio del 40%, se debe utilizar una velocidad de paso de 16 gpm/ft<sup>2</sup> y un tiempo de lavado de 10 minutos. En el cuadro 19 se presentan los resultados obtenidos para el lavado del material filtrante.

**Cuadro 19. Lavado del material filtrante.**

Parámetro	Resultado	Unidades
Velocidad retrolavado	16	gpm/ft <sup>2</sup>
Velocidad retrolavado	39.04	m/h
Tiempo de lavado	10	min
Tiempo de enjuague	10	min
Temperatura agua	30	°C
Temperatura agua	86	°F
Expansión del medio	40	%
# tanques a lavar simultáneos	1	Unidad
Volumen retrolavado/tanque	7.8	m <sup>3</sup> /tanque
Volumen de enjuague/tanque	2.0	m <sup>3</sup> /tanque
Frecuencia de lavado	1	días
Caudal necesario para lavado	13.1	L/s

*Referencia: Elaboración propia.*

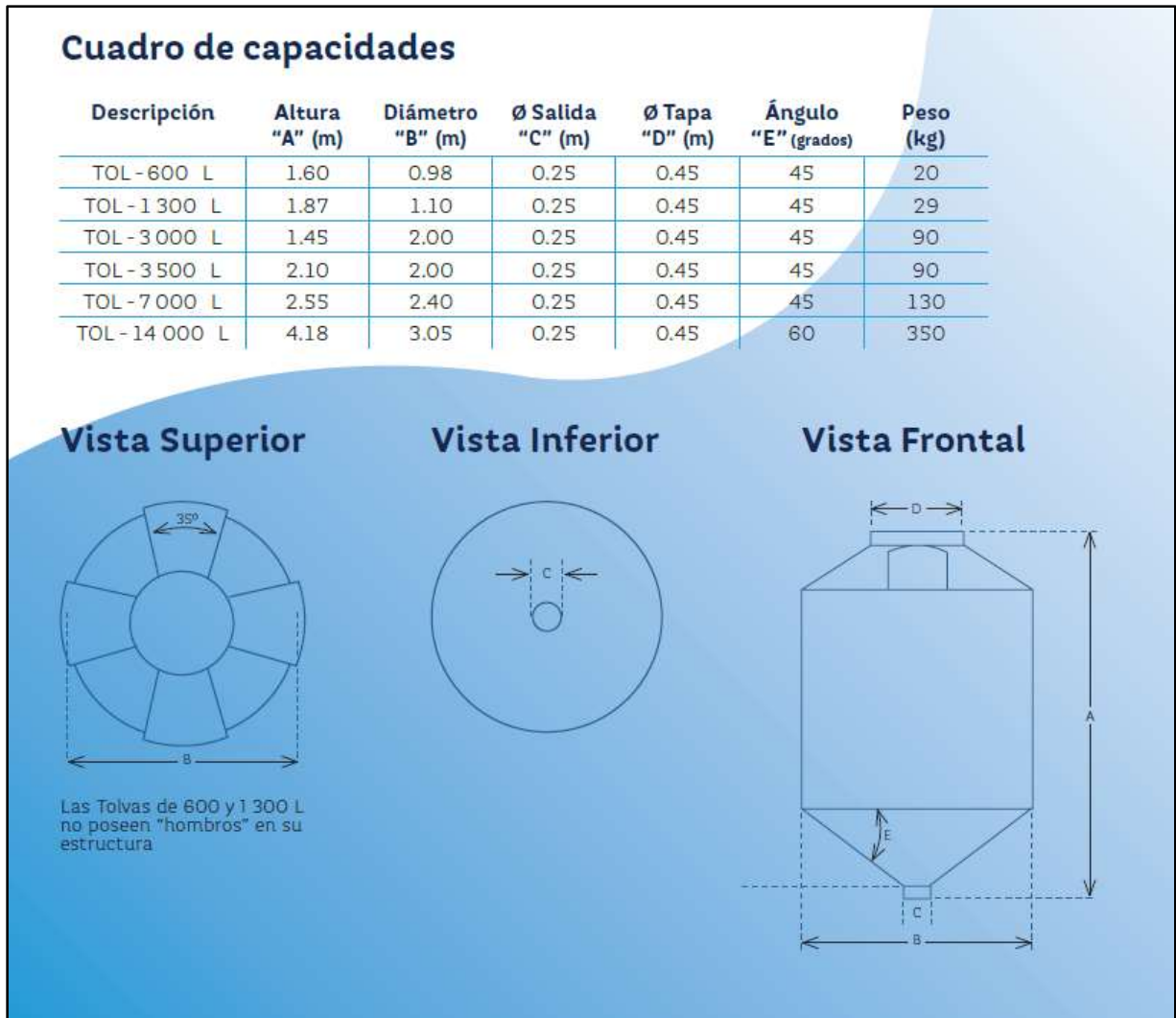


Como puede observarse, para el lavado de 1 tanque presurizado que contiene  $\text{MnO}_2$ , se requiere de  $7.8 \text{ m}^3$  de agua para el retrolavado y de  $2.0 \text{ m}^3$  de agua para el enjuague (velocidad de lavado = velocidad de filtración); para un total de  $9.8 \text{ m}^3$  de aguas residuales producidas para el lavado de uno de los 2 tanques presurizados. Si se quisieran lavar los dos tanques simultáneamente, se generarían aproximadamente  $20 \text{ m}^3$  de residuos. Por experiencia, para esta calidad de agua, se espera que el lavado de los medios filtrantes se realice cada 24 a 48 horas.

Utilizando los resultados de los cuadros 18 y 19 se propone que el sistema para la gestión de los residuos esté compuesto de 3 tolvas plásticas de  $7 \text{ m}^3$  de capacidad cada una y de lechos de secado. Las tolvas recibirán las aguas de retrolavado y enjuague de los medios, luego de dejar reposar estas aguas residuales por algunas horas, sedimentarán al fondo de las tolvas las partículas de sólidos removidas durante la potabilización del agua. Estos sólidos o lodo se podrán purgar de las tolvas a través del uso de válvulas y serán enviados a los lechos de secado para ser deshidratados. En la figura 15 se presenta un ejemplo de tolvas plásticas y las características de estas.



Figura 15. Tolvas plásticas para espesado de aguas de lavado de medios.



Referencia: Rotoplas. (2018).

Debido a que el GAC se lavará cada 7 a 15 días, se propone que el lavado de los tanques se realice en días distintos; de esta manera se puede aprovechar el sistema de gestión de residuos de mejor manera y no se debe hacer más complejo o grande. Respecto al medio filtrante de  $MnO_2$ , al lavarse aproximadamente cada 24 horas, se considera que se pueden lavar los dos tanques presurizados en el mismo día.



Del cuadro 18 se obtiene el volumen de lavado para cada uno de los tanques de GAC y el del enjuague. En total se generan 16.1 m<sup>3</sup> de aguas residuales por el lavado de cada tanque. Con respecto al MnO<sub>2</sub>, del cuadro 19 se obtiene que el lavado de cada tanque genera 9.8 m<sup>3</sup> de aguas residuales (retrolavado y enjuague); para un total de 19.6 m<sup>3</sup> para los dos tanques presurizados; este valor es un poco menor a la capacidad total de las 3 tolvas (21 m<sup>3</sup>).

Para determinar el volumen de lodo espeso que se puede generar del proceso de espesado a gravedad en la tolva, el cual se va a purgar a los lechos de secado, se realiza un balance de masa para cada una de las tres tolvas propuestas. Para lo anterior, se utilizan las siguientes suposiciones:

- La concentración de SS del agua residual que ingresa a la tolva (retrolavado de MnO<sub>2</sub> y agua de enjuague) es de 200 mg/L (Referencia: prueba para retrolavado de P.P Limón Sur, 2019).
- La concentración del lodo espeso en el cono de la tolva será de 5 000 mg/L.
- La concentración del sobrenadante en la tolva será de 50 mg/L.

Del balance de masas mencionado se obtiene un caudal de purga para cada una de las tolvas de 0.2 m<sup>3</sup>/d; siendo en total de 0.60 m<sup>3</sup>/d. Si se utilizan lechos de secado para el deshidratado de este lodo y se aplica una altura de lámina de lodo de 0.3 m, se requieren de 2 m<sup>2</sup> de área superficial para aplicarlo (los 0.6 m<sup>3</sup>/d). Se supone que el lodo quedará retenido en las arenas del lecho de secado y el agua percolará por la arena y saldrá filtrada a través del drenaje de la estructura.

Una vez se colmate la arena el agua no podrá pasar a través de esta, por lo que se procederá a sacar de operación ese lecho de secado. Adicionalmente, se estima que se requiere de 21 días para el deshidratado de este lodo, por lo que se debe contar con al menos tres lechos de secado adicionales. Lo anterior, se deduce de la propuesta de



funcionamiento de los lechos. Para el lecho de secado 1, se depositan todos los días, las purgas de los espesadores a gravedad; esto se realiza durante 7 días consecutivos. Al final de la semana, el lecho de secado sale de operación y se deja secando durante aproximadamente 21 días. Al iniciar la segunda semana (día 8) se empiezan a depositar los lodos en el lecho de secado 2; esto se realiza durante 7 días seguidos (semana 2). Al finalizar esta semana, el lecho se saca de operación y se deja secar durante aproximadamente 21 días (3 semanas). Al inicio de la semana 3, los lodos son depositados en el lecho 3 y se continúa de la misma manera en que se ha explicado.

La representación gráfica del proceso de carga (C), secado (S) y limpieza (L) de los lechos de secado, se presenta en la siguiente figura. De esta manera, si se depositan los lodos producidos de purga del espesador, todos los días durante una semana y luego se detiene el lecho para el secado de estos; se podrá utilizar el lecho 2 durante otra semana para luego detenerlo. Se utilizará el lecho tres durante otra semana y al final de esta se detendrá y se empezará a utilizar el lecho 4. Para esta cuarta semana, el lodo del primer lecho tendrá 21 días de estarse secando y se considera que se puede recoger; para que cuando se saque de operación el cuarto lecho, el primero ya se encuentre limpio y pueda volverse a utilizar. El proceso descrito puede describirse mediante la figura 16.

**Figura 16. Imagen del proceso de utilización de los lechos de secado.**

Semana	Lechos de secado			
	1	2	3	4
1	C			
2	S	C		
3	S	S	C	
4	S + L	S	S	C
5	C	S + L	S	S
6	S	C	S + L	S
7	S	S	C	S + L
8	S + L	S	S	C

C: Carga      S: Secado      L: Limpieza

Referencia: *Elaboración propia.*



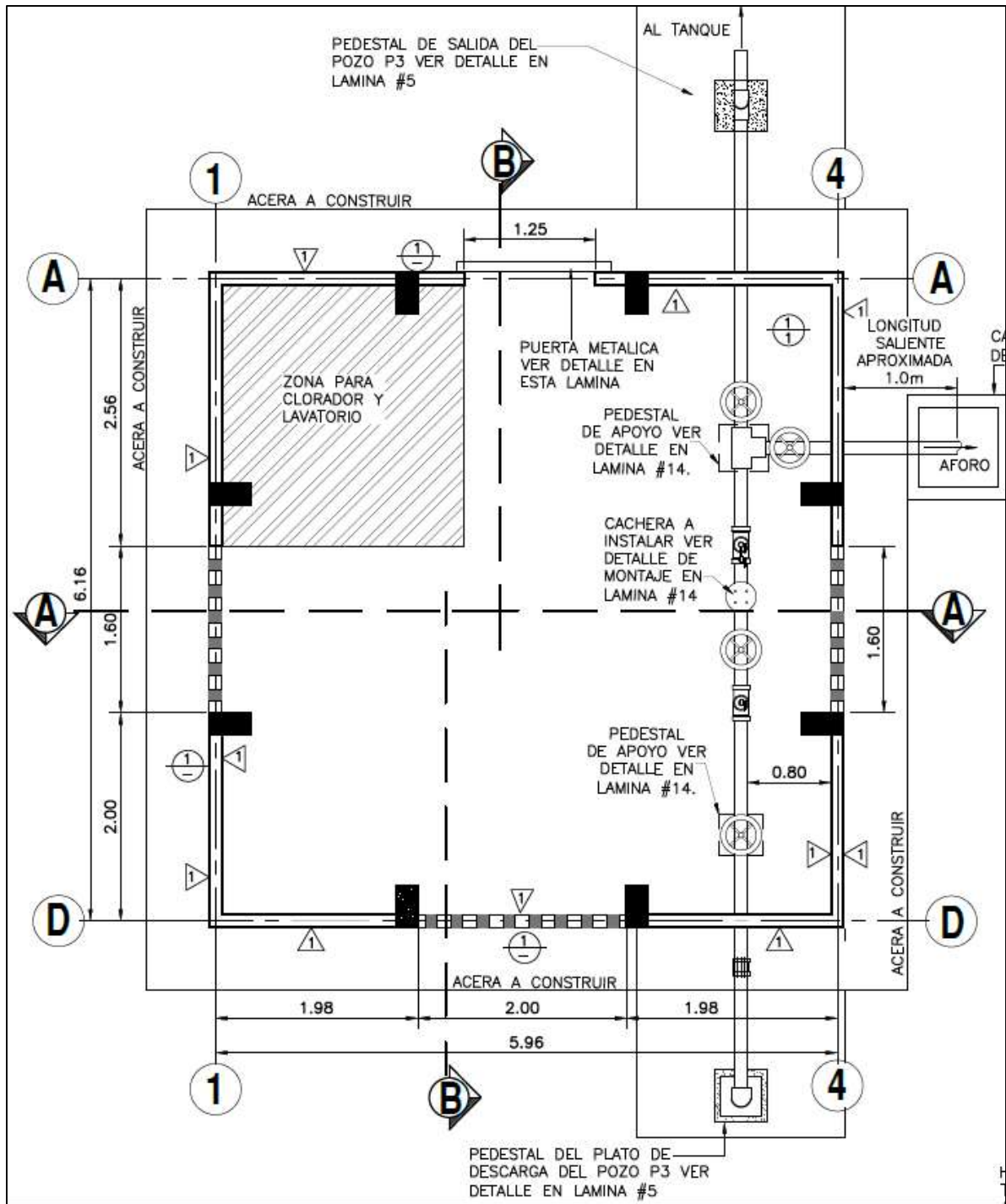
Al ser lechos de secado de  $2 \text{ m}^2$ , se considera que pueden ser construidos de 1 m de ancho por 2 metros de largo. Como se utilizan tres tolvas que van a recibir el lavado de los dos filtros de  $\text{MnO}_2$  ( $19.6 \text{ m}^3$ ), cada una de las tolvas va a recibir  $6.6 \text{ m}^3/\text{d}$  ( $19.6/3$ ) con una SS de  $200 \text{ mg/L}$ . Como se mencionó anteriormente, la concentración SS de las purgas se estima será de  $5\,000 \text{ mg/L}$  y el caudal producido de  $0.20 \text{ m}^3/\text{d}$  por cada tolva ( $0.6 \text{ m}^3/\text{d}$  en total). Con estos datos, se puede estimar la cantidad de SS o Sólidos Secos (DS) que se depositan en los lechos de secado. Se estima se generan  $2.99 \text{ kgDS/d}$ , lo que es equivalente a  $1090.2 \text{ kgDS/año}$ .

Si se divide este valor de aplicación de sólidos secos entre el área total de los lechos de secado, se puede obtener la tasa de aplicación de sólidos. Según Metcalf & Eddy (2003) para un lodo digerido primario y precipitado químicamente, se estima una tasa de carga de lodo de  $100$  a  $160 \text{ kgDS/m}^2\cdot\text{año}$ . Si se calcula la tasa de aplicación de sólidos para el proyecto en cuestión, se obtiene una tasa de  $137 \text{ kgDS/m}^2\cdot\text{año}$  ( $1090/(4\cdot 2)$ ); valor que se encuentra dentro de lo recomendado por la literatura.


### 3.8.1.7 Esquema de conjunto.

El terreno donde se encuentra el pozo de La ASADA de Aguas Frías es bastante amplio, además cuenta con una caseta donde se encuentra la cachera del pozo y el sistema de producción y dosificación de hipoclorito de sodio. Un esquema de la caseta existente se presenta en la siguiente figura.

Figura 17. Esquema de caseta existente.



Referencia: Planos del Inder, aportados por SD. (2015).

	<b>Informe técnico</b>		Página <b>84</b> de <b>124</b>
	<b>CÓDIGO:</b> GTE-106-02-F3	<b>N° de Versión:</b> 01	

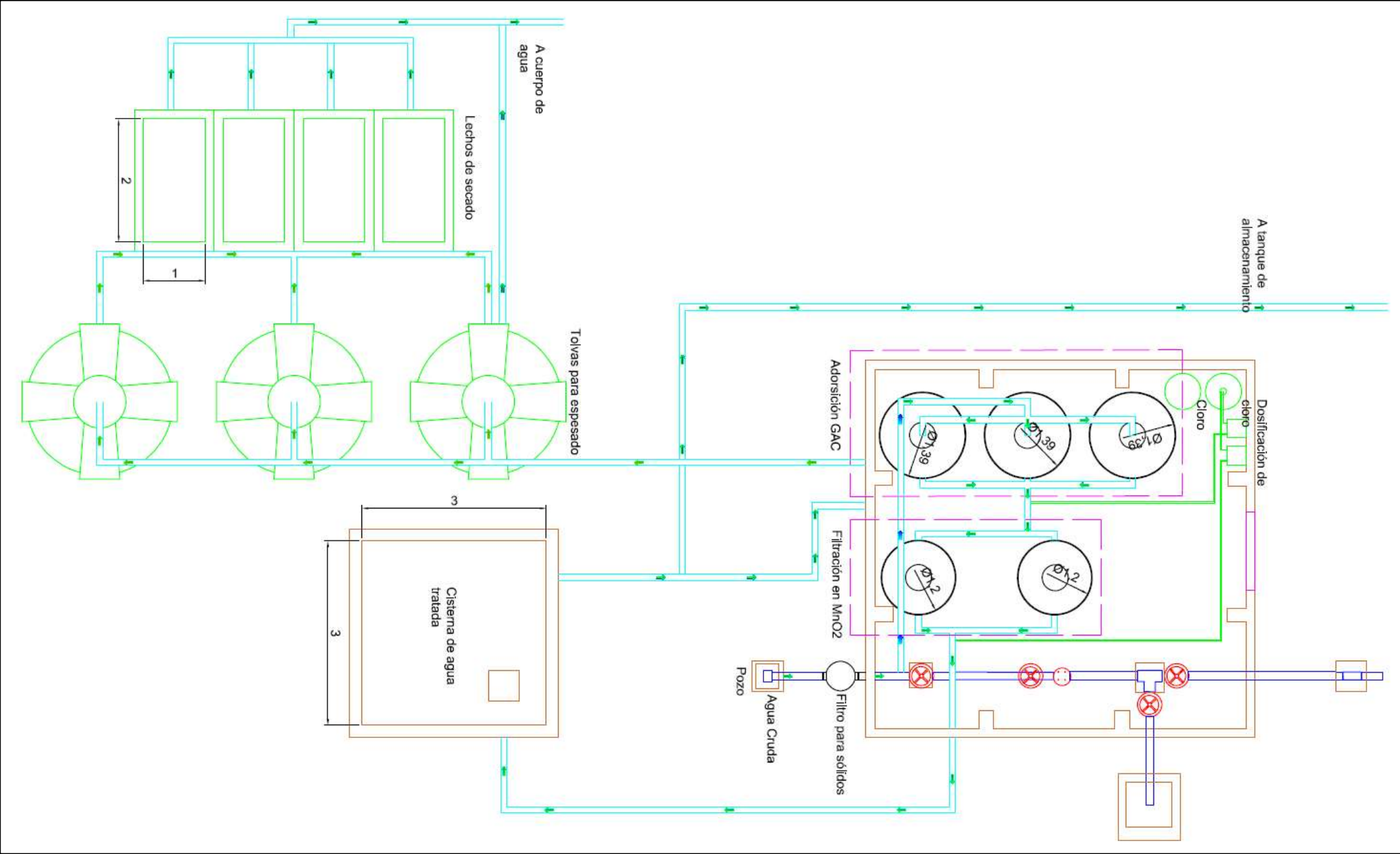
Es importante mencionar, que las dimensiones de la caseta y las ubicaciones que se muestran en la figura anterior y que se utilizan para el desarrollo de esta sección, no fueron verificadas en campo. Adicionalmente, la propuesta que se realiza debe ser verificada por la Unidad de Administración de Proyectos de la Subgerencia de Sistemas Delegados. Es necesario corroborar que las obras, accesorios, productos y equipos quepan y calcen dentro de las áreas propuestas; por ejemplo, se debe verificar que los tanques presurizados pasen por la puerta existente, quepan dentro de la caseta (tanto en altura como en planta).

Se procedió a dibujar los procesos de potabilización y gestión de residuos propuestos y a tratar de ubicarlos (los que corresponden) dentro de la caseta existente. La idea es que el agua cruda se tome de la cachera existente, se pase a través de un filtro de sólidos particulados, se haga pasar a través de los tanques presurizados con carbón activado, se oxide mediante la aplicación de cloro, se remueven los metales oxidados a través de un medio catalítico de  $MnO_2$ , se realice la desinfección del agua (en caso de que el cloro se haya consumido en las etapas anteriores) y se dé un tiempo de contacto del cloro con el agua en el cisterna de agua tratada.

Con respecto a los residuos generados, el agua residual de los retrolavados y enjuague de los medios será enviada a las tolvas (espesadores), el lodo espeso a los lechos de secado y el agua clarificada y el filtrado de los lechos de secado se dispondrá en un cuerpo de agua. Esta propuesta debe ser validada por la Subgerencia de Sistemas Delegados a través de pruebas y monitoreos. En caso de que algún valor no cumpla con lo que indica la legislación nacional, se deben evaluar alternativas para resolver la situación.

Un esquema general de los procesos y operaciones mencionadas se presenta en la figura 18.

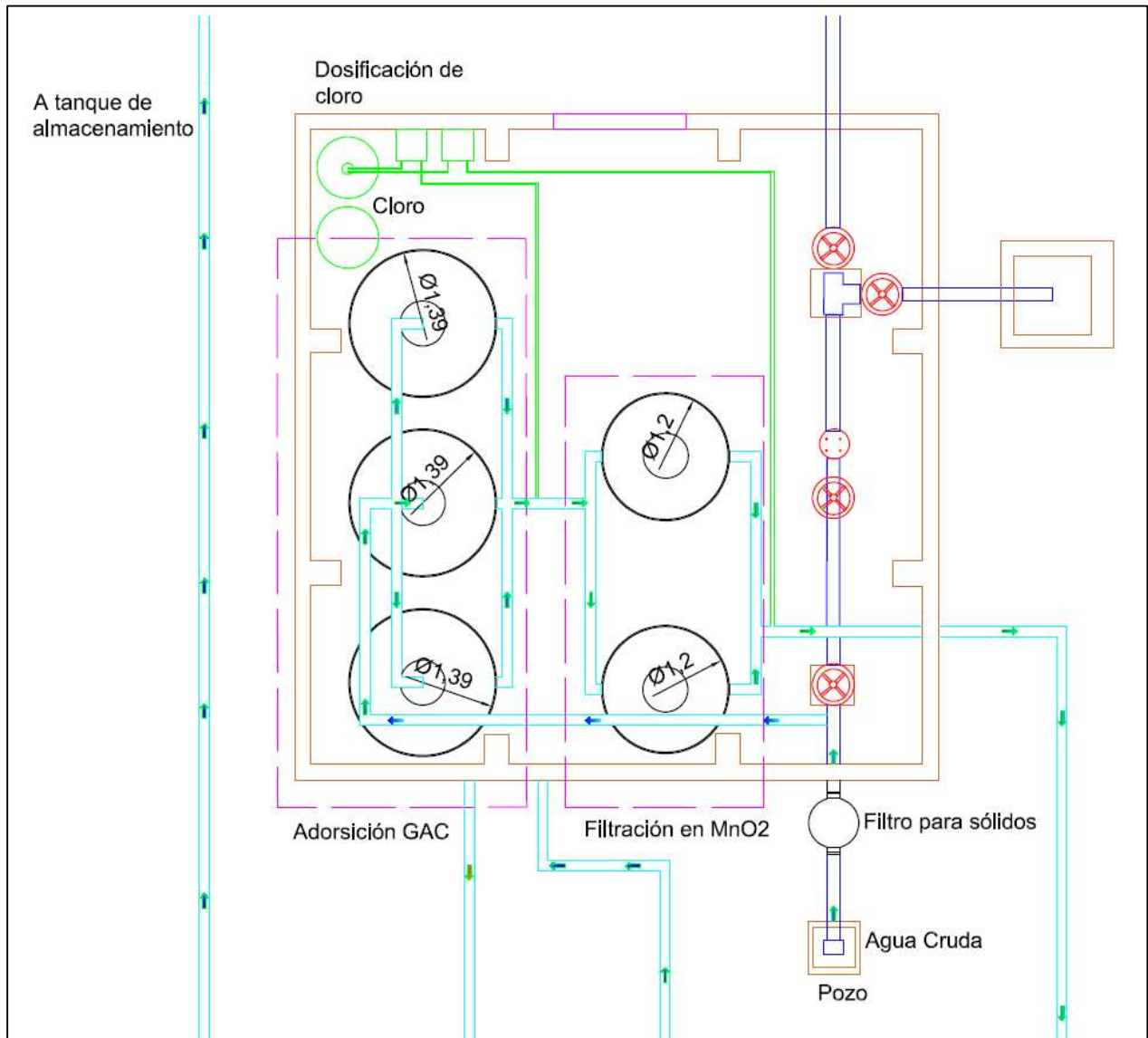
Figura 18. Esquema general de procesos y operaciones.



Referencia: Elaboración propia.

En la figura 19 se muestran los procesos de potabilización, mismos que se encuentran dentro de la caseta.

**Figura 19. Procesos de potabilización.**



*Referencia: Elaboración propia.*

Como puede observarse, preliminarmente parece que los procesos caben dentro de la caseta, un poco ajustado, en especial el área para la cloración. Es importante

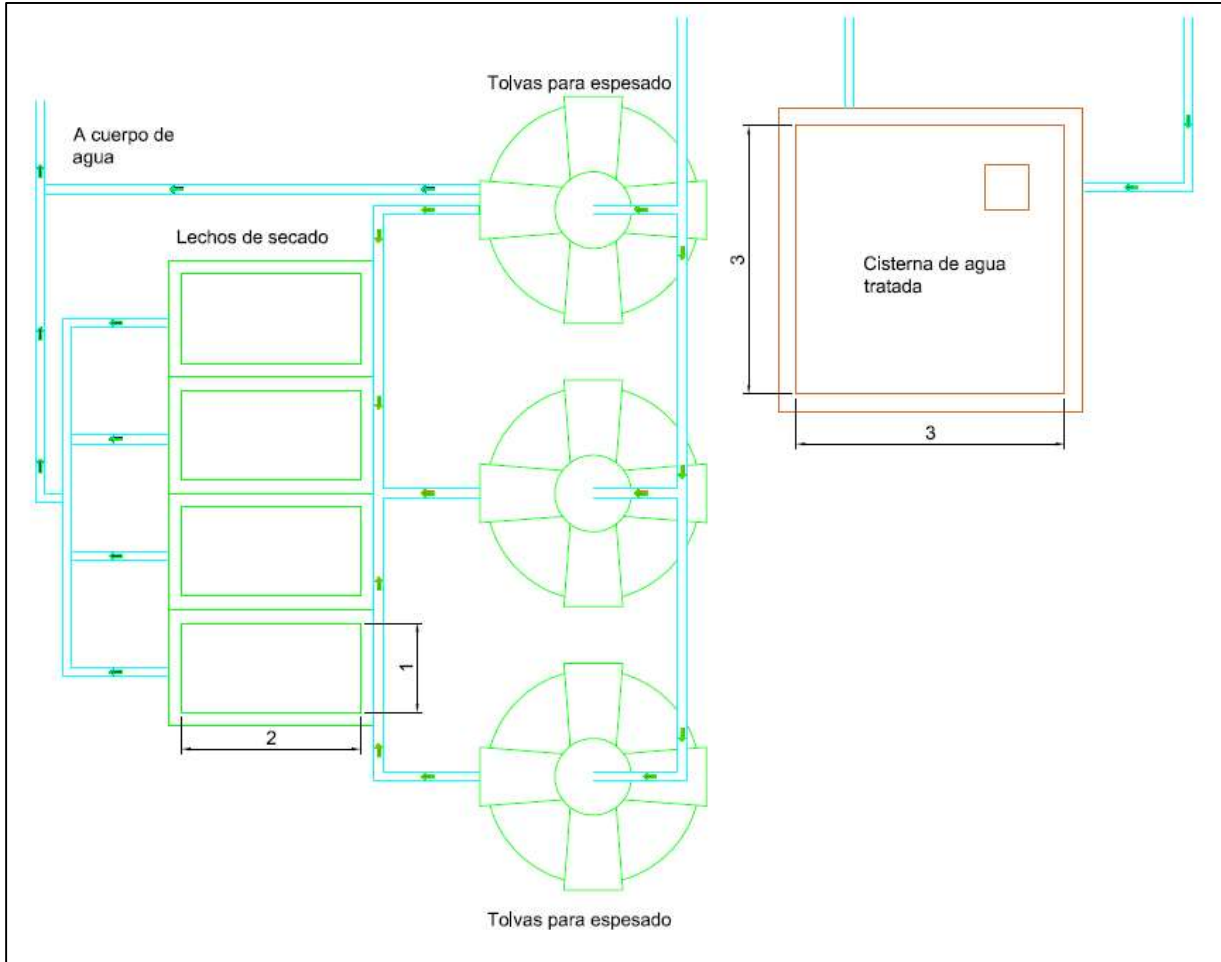


mencionar, que la figura representa una propuesta de distribución, es posible que existan muchas otras que deban valorarse. Por lo ajustado del tamaño del sistema de tratamiento respecto al área disponible en la caseta, el filtro de sólidos se colocó en la parte externa; lo anterior para que se consideren aspectos de capacidad de trabajo a la intemperie y aspectos de vandalismo. A través de flechas se presenta el flujo de agua, desde el pozo, pasando por el filtro de sólidos, el GAC, cloración, el MnO<sub>2</sub> y finalmente la desinfección. Se decide no eliminar la tubería que cruza la caseta, pues podría ser útil si en algún momento se considera realizar un “bypass” del sistema de potabilización.


En la figura 20 se presenta un detalle de la cisterna de agua tratada y del sistema para la gestión de las aguas residuales. Como puede observarse, de la cisterna se puede enviar agua al tanque de almacenamiento para su distribución, pero también se puede utilizar agua tratada para el lavado de los materiales filtrantes y adsorbente. Respecto al sistema de tratamiento de las aguas residuales, como ya se mencionó el clarificado de las tolvas y el filtrado de los lechos de secado puede ser enviado a un cuerpo de agua; el lodo espeso a los lechos de secado.



**Figura 20. Cisterna de agua tratada y sistema de gestión de aguas residuales.**



*Referencia: Elaboración propia.*

	<b>Informe técnico</b>		Página <b>89</b> de <b>124</b>
	<b>CÓDIGO:</b> GTE-106-02-F3	<b>N° de Versión:</b> 01	


### **3.8.1.8 Costo de capital.**

Para realizar una estimación del costo de inversión para el proyecto, se recurre a la base de datos de proyectos del Área Funcional de Investigación Aplicada, donde se encuentran datos para proyectos ejecutados y cotizaciones para estudios de mercado. De la base de datos se seleccionan los proyectos que pueden ser similares; en este caso se busca que los contaminantes se remuevan mediante medios granulares filtrantes y adsorbentes y se estima el costo de capital por L/s potabilizado. Los contaminantes que se pueden remover del agua de una forma similar y que se encuentran en la base de datos mencionada son:

- Aluminio: ajuste de pH y filtración; también mediante membranas.
- Hierro y manganeso: oxidación y filtración catalítica.
- Arsénico: material adsorbente y membranas.

En el caso de aluminio, se encuentran en la base de datos 3 costos de capital (1 proyecto existente y 2 estudios de mercado) para caudales desde los 3.5 a los 10 L/s. El promedio de costos de los datos indicados es de \$35 624 por L/s tratado. Para el caso del hierro, se cuenta con 11 costos de capital (8 proyectos y 3 cotizaciones) para caudales entre los 2.5 a 90 L/s. El promedio de costos para los datos para hierro y manganeso es de \$34 776 por L/s tratado. Para el arsénico, se cuenta con 11 costos de capital (6 proyectos y 5 cotizaciones) para caudales entre los 2 a 15 L/s. El promedio de los costos de los datos indicados es de \$59 000 por L/s de agua tratada.

De los datos anteriores, se podría desprender que para los contaminantes mencionados en el párrafo anterior el costo del sistema de tratamiento por L/s de agua tratada se encuentra entre los \$35 000 y los \$59 000. Si se utiliza este rango de costos y se sabe que se deben tratar para el caso de Aguas Frías aproximadamente 6.7 L/s, se

	<b>Informe técnico</b>		Página <b>90</b> de <b>124</b>
	<b>CÓDIGO:</b> GTE-106-02-F3	<b>N° de Versión:</b> 01	

podría esperar que el costo de capital de las obras de potabilización se encuentre entre los \$234 500 y los \$395 300.

### **3.8.1.9 Costos de operación y mantenimiento.**

Con el fin de poder estimar los costos de operación y mantenimiento de la planta potabilizadora, se procede a identificar los principales rubros de costos. Es importante indicar que, para la estimación realizada, se supone que la PP trabajará durante 12 horas al día los 365 días del año y el caudal producido será de 6.7 L/s. Este es un escenario futuro, pues actualmente el sistema trabaja aproximadamente 4 horas al día a un caudal de 9 L/s.

#### **3.8.1.9.1 Mano de Obra.**


Se utiliza un dato de salario horario de operador de PP de ¢3 174. Con este dato y considerando que se debe operar el sistema durante 12 horas al día por 30.48 días al mes, se obtiene un costo asociado a mano de obra de: ¢1 160 922.

#### **3.8.1.9.2 Cargas sociales.**

Se supone que las cargas sociales asociadas a la mano de obra, donde se incluye: el seguro a la CCSS, vacaciones, aguinaldo y otros, se encuentra cercano a un 42% (departamento de Capital Humano AyA) del salario. Por lo anterior, se estima que las cargas sociales serán de: ¢487 578.

#### **3.8.1.9.3 Energía eléctrica.**

Respecto al consumo de energía eléctrica, se estima que la demanda se dará por el sistema de bombeo, bombas dosificadoras, medidores de caudal e iluminación. El detalle de los costos estimados se presenta en el cuadro 20.

	<b>Informe técnico</b>		Página <b>91</b> de <b>124</b>
	<b>CÓDIGO:</b> GTE-106-02-F3	<b>N° de Versión:</b> 01	

**Cuadro 20. Desglose del consumo y costos de energía.**

Componente	# de unidades	Potencia (HP)	Potencia (W)	Potencia (kW)	Operación (h/d)	Energía (kWh/d)	Costo (¢/kWh)	Costo (¢/d)	Costo (¢/mes)
Bombas	1	10	7355	7.335	12	88.26	110	9709	295 918
Dosificadores	2		50	0.1	12	1.2	110	132	4 023
Medidores	2		10	0.02	12	0.24	110	26.4	805
Iluminación	8		15	0.12	24	2.88	110	316.8	9 656

*Referencia: Elaboración propia.*

**Cuadro 21. Consumo de cloro y costo asociado. Concentración de cloro al 12%. Caudal de PP: 6.7 L/s**

Dosis (mg/L)	Costo tambor 200 L (¢)	Costo/L (¢)	Func. (h/d)	Vol. tratada (L/d)	Requer. (kg/d)	Requer. (L/d)	Costo (¢/d)	Costo (¢/mes)
11	77 500	388	12	289 440	3.18	26.5	10 281	313 369

*Referencia: Elaboración propia.*



### 3.8.1.9.4 Productos químicos.

El único producto químico que se considera se consume de manera permanente es el cloro. Para estimar el costo por el consumo de cloro, se supone se utiliza hipoclorito de sodio al 12%. La estimación del consumo y costo asociado se presenta en el cuadro 21. El costo del litro de cloro al 12% se obtiene de una cotización de un tambor (estación) de 200 L (IQN, 2021).

### 3.8.1.9.5 Monitoreo.

Para el monitoreo, se propone que se haga un control operativo, el cual es realizado por el operador de la PP con equipo apropiado. Adicionalmente, se sugiere que algunos parámetros se monitoreen de forma mensual con el fin de determinar la eficiencia del sistema de tratamiento y en el caso específico del GAC para ir determinando la vida útil de este adsorbente. El monitoreo mensual se realizaría por laboratorios acreditados. En el cuadro 22 se presentan los costos asociados estimados para el monitoreo del sistema de potabilización.

**Cuadro 22. Monitoreo del funcionamiento del sistema de potabilización.**

Prueba	Parámetro	# pruebas/d	# pruebas/mes	Costo de la prueba (¢)	Costo diario (¢/d)	Costo mensual (¢/mes)
Presuntiva	Hierro	3		500	1 500	45 720
	Manganeso	3		2 500	7 500	228 600
	H <sub>2</sub> S	3		1 500	4 500	137 160
Laboratorio Acreditado	COT, COD		1	56 500		56 500
	H <sub>2</sub> S		1	65 540		65 540

*Referencia: Elaboración propia.*



### 3.8.1.9.6 Transporte y disposición de residuos.

Como se genera de manera frecuente lodo seco en los lechos de secado, el mismo debe ser recogido y dispuesto en un relleno sanitario. Utilizando los datos generados para el dimensionamiento de los lechos de secado y el costo de transporte y disposición de biosólidos adjudicado por la PTAR Los Tajos, se estima el costo asociado a esta actividad. En el cuadro 23 se presenta el detalle del valor mencionado.

**Cuadro 23. Costo de transporte y disposición de residuos sólidos.**


Residuo	Prod. (kg/d)	Prod. (kg/mes)	Prod. (ton/mes)	Costo/ton (¢)	Costo mensual (¢)
Lodo seco	12	364.2	0.364	34 500	12 564

*Referencia: Elaboración propia.*

### 3.8.1.9.7 Reemplazo de material adsorbente.

El material adsorbente (GAC) tiene una vida útil que depende de la calidad del agua y la cantidad de agua tratada; así como de la correcta operación del sistema de potabilización. Una vez se agote la capacidad del medio mencionado, éste debe ser reemplazado, tratado y dispuesto de manera adecuada según las regulaciones aplicables. Con los datos obtenidos del dimensionamiento preliminar realizado (volumen de material) se procedió a calcular el costo de su reemplazo.

La estimación de la vida útil del GAC, se obtuvo revisando literatura donde se utiliza el GAC para remover NOM. Según Vahala (2002) para un agua con un TOC de 2.8 mg/L y para distintas velocidades de flujo y configuraciones del sistema, se obtuvieron 15 000 BVs (Bed Volumes) para llegar a la ruptura total del material y según un gráfico mostrado, se obtienen 5 000 BV para llegar a un punto donde la concentración efluente es del 50% de la afluente. Este último valor fue el utilizado en nuestro caso pues la concentración de TOC en agua cruda se encontró cercana a 4 ó 5 mg/L. Si se estima una vida útil de 5 000 BVs, para un caudal de 6.7 L/s, una producción de 12 horas al día y un volumen total

	<b>Informe técnico</b>		Página <b>94</b> de <b>124</b>
	<b>CÓDIGO:</b> GTE-106-02-F3	<b>N° de Versión:</b> 01	

de GAC de 5.6 m<sup>3</sup>, se obtiene una vida útil estimada de 3.2 meses; es decir el material se debe reemplazar cada 3.2 meses.

En el cuadro 24 se presenta el costo del reemplazo del material adsorbente, se estima también lo que debe ahorrarse mensualmente para poder tener el dinero una vez se requiera el cambio de medio. El costo del pie cúbico (presentación comercial del producto) se obtiene de una cotización realizada por la empresa Hidroclear (2021).

### **3.8.1.9.8 Reemplazo de medio filtrante.**

El medio filtrante (MnO<sub>2</sub>) va perdiendo su capacidad catalítica con el tiempo y además sus características físicas también. Se estima que la vida útil de este material puede ser cercana a los 3 años, pudiendo ser menor o mayor dependiendo de cómo se opere el sistema de potabilización. Una vez agotada su capacidad catalítica, algunos medios pueden ser regenerados y otros deben ser reemplazados. Tanto los residuos generados en la regeneración del medio como el medio agotado deben tratarse y disponerse de manera adecuada según la legislación aplicable. En el cuadro 25 se presenta el costo de reemplazo del medio. El costo del material se obtiene de una cotización de la empresa Hidroclear (2021).

**Cuadro 24. Costo de reemplazo de material adsorbente (GAC).**

# tanques	Vol/tan(m <sup>3</sup> )	Vol. total (m <sup>3</sup> )	Vol. total (ft <sup>3</sup> )	Costo (¢/ft <sup>3</sup> )	Costo total (¢)	Reemplazo @ (mes)	Costo mensual (¢)
3	1.876	5.628	199	48 940	9 725 848	3.2	3 039 327

*Referencia: Elaboración propia.*

**Cuadro 25. Costo de reemplazo del medio filtrante MnO<sub>2</sub>.**

# tanques	Vol/tan(m <sup>3</sup> )	Vol. total (m <sup>3</sup> )	Vol. total (L)	Costo/L (¢)	Costo total (¢)	Reemplazo @ (mes)	Costo mensual (¢)
2	1.206	2.412	2 412	2 776	6 695 712	36	185 992

*Referencia: Elaboración propia.*




El costo total de operación y mantenimiento de la PP se estima como la suma de los costos anteriormente presentados. En el cuadro 26 se muestra un resumen y estimado del costo total de operación y mantenimiento.

**Cuadro 26. Costo estimado de operación y mantenimiento.**

Aspecto	Costo mensual (¢)
Mano de obra	1 160 922
Cargas sociales	487 587
Energía eléctrica	310 402
Químicos (cloro)	313 369
Pruebas presuntivas	411 480
Pruebas acreditadas	122 040
Transporte y recolección de servicios	12 564
Reemplazo GAC	3 039 327
Reemplazo MnO <sub>2</sub>	185 992
Total, mensual	6 043 685

*Referencia: Elaboración propia.*

Como puede observarse, se estima un costo mensual de operación y mantenimiento del sistema cercano a los ¢6.0 millones. Como puede observarse, de los costos mencionados, el 50% corresponde al reemplazo del GAC; por lo que se recomienda, realizar pruebas a escala para determinar de manera más realista la vida útil del GAC. Lo anterior podría mejorar o empeorar el panorama. Si se estima el costo de operación y mantenimiento de la PP por metro cúbico de agua producida, se obtiene un valor de ¢685/m<sup>3</sup> de agua producida. Lo anterior solamente incluye los costos de operar la PP.

	<b>Informe técnico</b>		Página <b>97</b> de <b>124</b>
	<b>CÓDIGO:</b> GTE-106-02-F3	<b>N° de Versión:</b> 01	

### **3.8.2 Proceso de potabilización mediante el uso de membranas.**

Según Crittenden (2011), se puede utilizar para remover materia orgánica natural (NOM) del agua, la tecnología de ósmosis inversa con membranas de nanofiltración (NF) o de ósmosis inversa (RO). Indica que se puede rechazar más del 90% de la NOM y precursores de SPD y que se ha utilizado efectivamente para este propósito en un número importante de instalaciones donde se trata agua subterránea con valores altos de color.

A pesar de la alta eficiencia para la remoción de NOM, otros métodos son frecuentemente utilizados; lo anterior debido a altos costos de capital, altos costos de operación, alto consumo energético y baja recuperación de agua producida, al compararla con otras tecnologías. Las membranas de NF que efectivamente remueven dureza del agua, también son efectivas para remover NOM, convirtiéndolas en una excelente opción de tratamiento para remoción de color y control de formación de SPD. (Crittenden, 2011).

Los sistemas de ósmosis inversa usualmente incluyen etapas de pretratamiento y acondicionamiento del agua previo al paso de esta por las membranas, esto para remover cualquier sólido en suspensión o agente que pueda afectar el proceso. La propuesta preliminar incluye los siguientes procesos u operaciones:

1. Extracción del agua del pozo.
2. Filtración del agua mediante discos auto limpiantes.
3. Filtración del agua en medio granular o mediante membranas de ultrafiltración.
4. Acondicionamiento del agua (control de pH, antiincrustante, etc).
5. Sistema de bombeo (en algunos casos) para aumentar presión.



6. Filtración mediante membranas de NF u RO. En esta etapa se remueve la NOM, el hierro, manganeso, potasio (depende de la membrana) y el amonio (depende de la membrana).
7. Acondicionamiento del agua permeada del sistema de membranas (ajuste de pH, remineralización, otros). En muchos casos, luego de las membranas de RO el pH es muy bajo, el agua corrosiva y con bajo contenido de minerales; por lo anterior debe acondicionarse.
8. Oxidación de H<sub>2</sub>S y amonio (en caso de que este último no haya sido removido) y desinfección.

### 3.8.2.1 Simulación en software.

Los fabricantes de membranas ponen a disposición de sus posibles clientes, software para realizar simulaciones de procesos de potabilización mediante el uso de sus productos. Esta actividad permite tener una idea del comportamiento del sistema bajo una calidad y cantidad de agua a tratar (datos a ingresar al sistema), si es posible remover los contaminantes evaluados, la cantidad y calidad del agua producida, la cantidad y calidad del agua rechazada por la membrana y los requerimientos de energía y productos químicos para el correcto funcionamiento del sistema. Lo anterior, a modo de estudio preliminar.

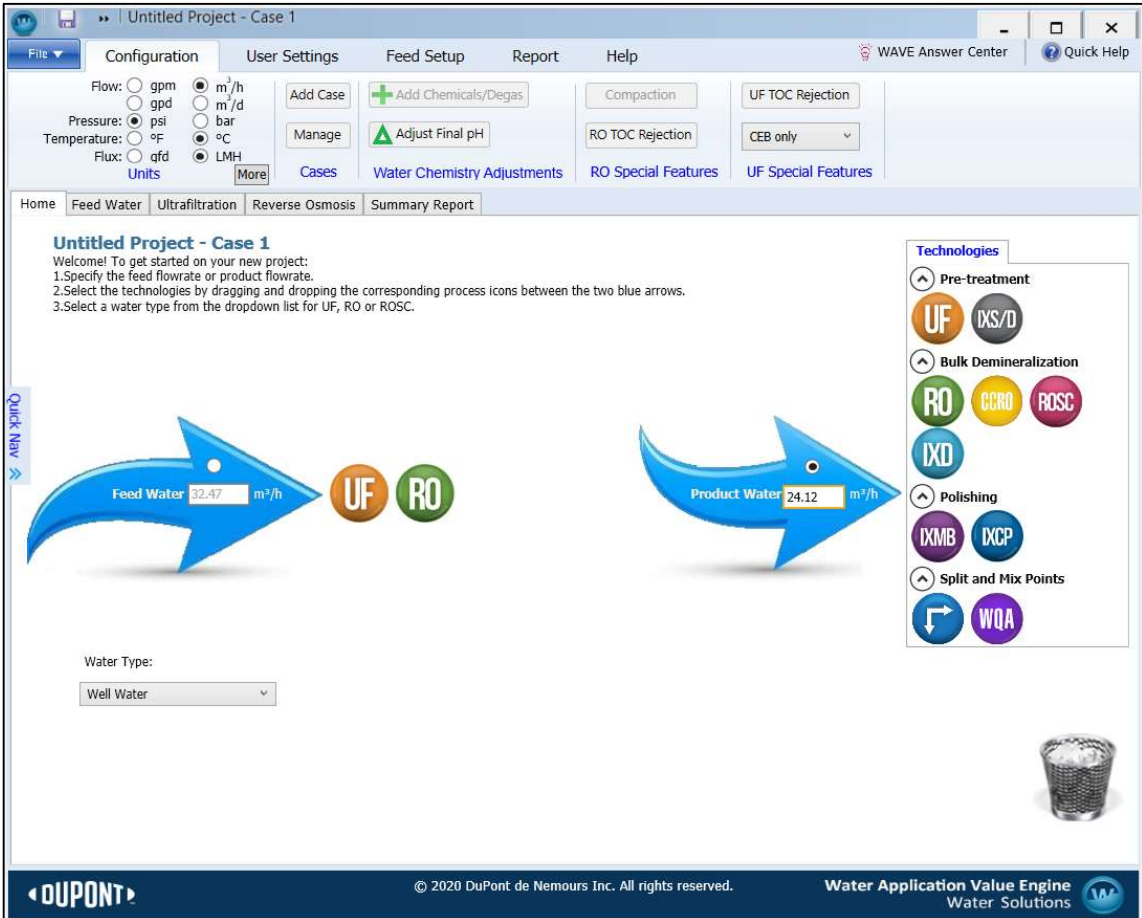
Para realizar esta tarea se utiliza el software denominado WAVE (Water Application Value Engine) de la empresa Du Pont; esto debido a que es el único que se logró encontrar que indica el porcentaje de remoción de NOM del sistema. Es importante indicar que existen en el mercado varios programas similares que pueden ser utilizados para un análisis preliminar como el presentado, entre ellos: Toray DS2 y Hydranautics.

Para el desarrollo del caso de estudio mediante el uso del software WAVE, se ingresa la información que se detalla a continuación.

Para la pestaña de datos principales (Home) se define lo siguiente (ver figura 21):


- Caudal de agua producida requerida: 24.12 m<sup>3</sup>/h (6.7 L/s).
- Tecnologías: ultrafiltración (pretratamiento) más ósmosis inversa (principal).
- Tipo de agua: agua de pozo.
- Rechazo de Carbono Orgánico Total (TOC) de la membrana de UF: 5%.
- Rechazo de Carbono Orgánico Total (TOC) de la membrana de RO: 80%.

**Figura 21. Datos de ingreso.**



The screenshot shows the WAVE software interface for 'Untitled Project - Case 1'. The 'Home' tab is active, displaying a process flow diagram. The 'Feed Water' flow rate is 32.47 m<sup>3</sup>/h, and the 'Product Water' flow rate is 24.12 m<sup>3</sup>/h. The 'Technologies' panel on the right lists various processes: Pre-treatment (UF, IXS/D), Bulk Demineralization (RO, CCRO, ROSC), Polishing (IXMB, IXCP), and Split and Mix Points (WQA). The 'Water Type' is set to 'Well Water'. The interface also includes a 'Quick Help' button and a 'WAVE Answer Center' link.

Referencia: Elaboración propia con software WAVE.

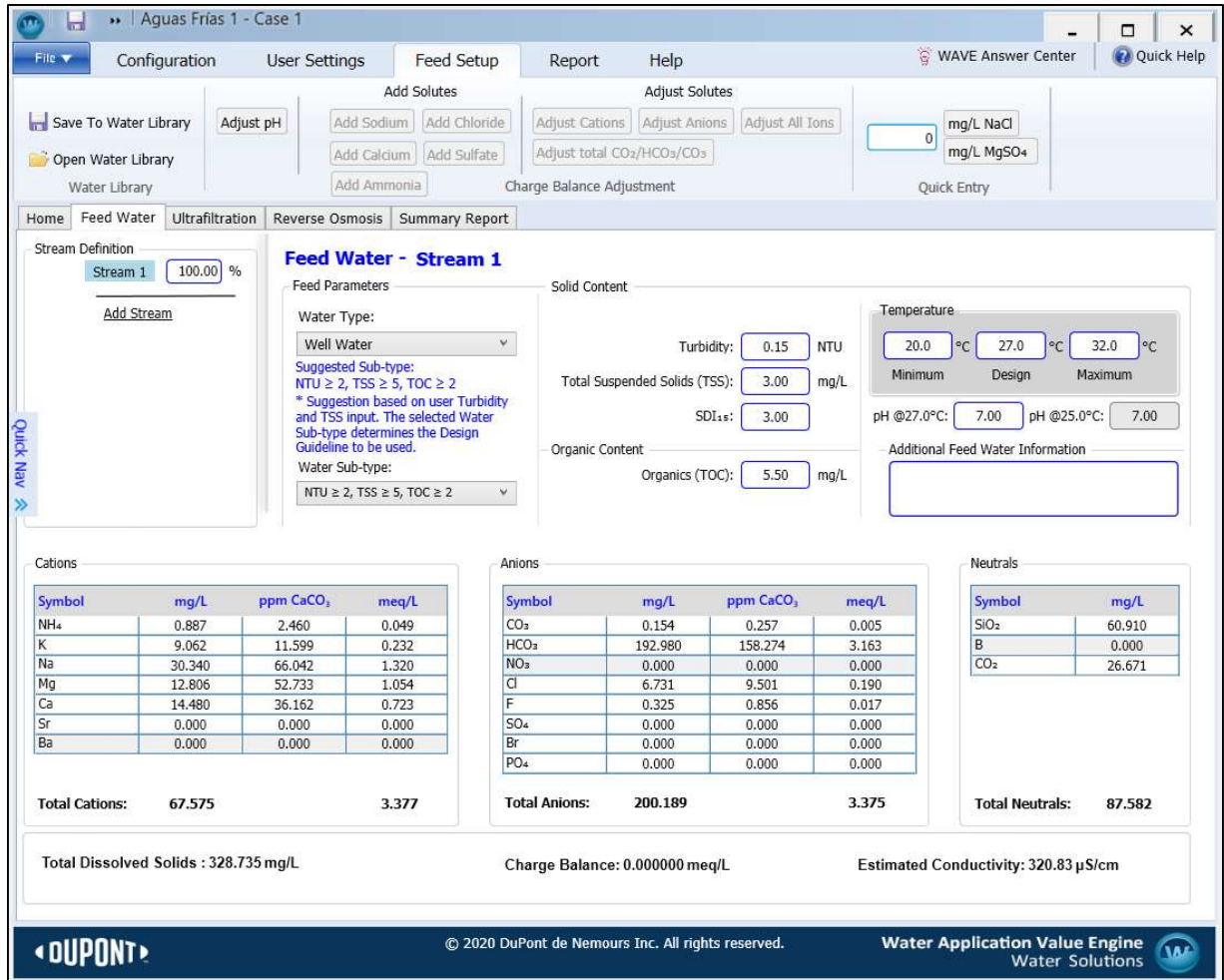
	<b>Informe técnico</b>		Página <b>100</b> de <b>124</b>
	<b>CÓDIGO:</b> GTE-106-02-F3	<b>N° de Versión:</b> 01	

Para la pestaña de Agua de Alimentación (Feed Water) se utilizan los siguientes datos:

- Turbiedad: 0.15 UNT.
- SDI: 3.
- TOC: 5.5 mg/L.
- Temperatura: 27°C.
- pH: 7.00.
- Sílice: 60 mgSiO<sub>2</sub>/L, de pruebas realizadas en campo y documentadas en este informe.
- SST (TSS) = 3 mg/L (se asume Turbiedad de 2 UNT y relación SST/Turb = 1.5).

Los demás valores se presentan en la figura 22 y se extraen del análisis realizado por el LNA (AyA-ID-0761-2020) al agua del pozo. Al ingresar los datos mencionados, y ajustar los iones para balancear las cargas (cationes y aniones), se obtiene una conductividad estimada de 320  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ; la cual es similar a la reportada por el LNA en el análisis mencionado (309  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ).

**Figura 22. Datos y resultados para pestaña de Agua de Alimentación.**



*Referencia: Elaboración propia con software WAVE.*

Al continuar con la pestaña de ultrafiltración (pretratamiento), se obtienen los resultados que se presentan en la figura 23.



Figura 23. Datos y resultado de la Ultrafiltración.

Referencia: Elaboración propia con software WAVE.

Como los sistemas de membranas generan aguas de rechazo, las cuales deben ser dispuestas de manera adecuada de acuerdo con sus características, el caudal afluente al sistema siempre es mayor que el efluente. En esta simulación, para las condiciones establecidas, el software indica que se requiere de un flujo afluente o de alimentación promedio de  $33.3 \text{ m}^3/\text{h}$  ( $9.2 \text{ L/s}$ ). La producción neta de filtrado es de  $32.2 \text{ m}^3/\text{h}$  y la producción de agua de rechazo de  $0.9 \text{ m}^3/\text{h}$ . Como se indica en el diagrama se recomienda el uso de un equipo de filtración (“strainer”) previo a la UF y el uso de un tren de UF con 8 módulos.



Adicionalmente, se presentan los requerimientos de un tanque de agua filtrada que será utilizado para realizar la limpieza de las membranas por retrolavado y para realizar el retrolavado mejorado con la utilización de productos químicos (“chemical enhanced backwash”, CEB). Se muestra también los requerimientos de un tanque de CIP (“clean in place”), que es un sistema para limpieza de membranas utilizando productos químicos. El agua producida pasará al sistema de membranas de RO o NF.

Un esquema resumen, con el balance de agua y generado por el software con los datos ingresados, se presenta en la figura 24. Según los resultados obtenidos, se debe realizar un retrolavado de las membranas de UF cada 63 min, un lavado ácido CEB cada 336 h, un lavado alcalino CEB cada 168 h y un lavado CIP cada 90 días (ver figura 23).

La calidad de agua producida por la UF según el software es la que se presenta en el cuadro 27.

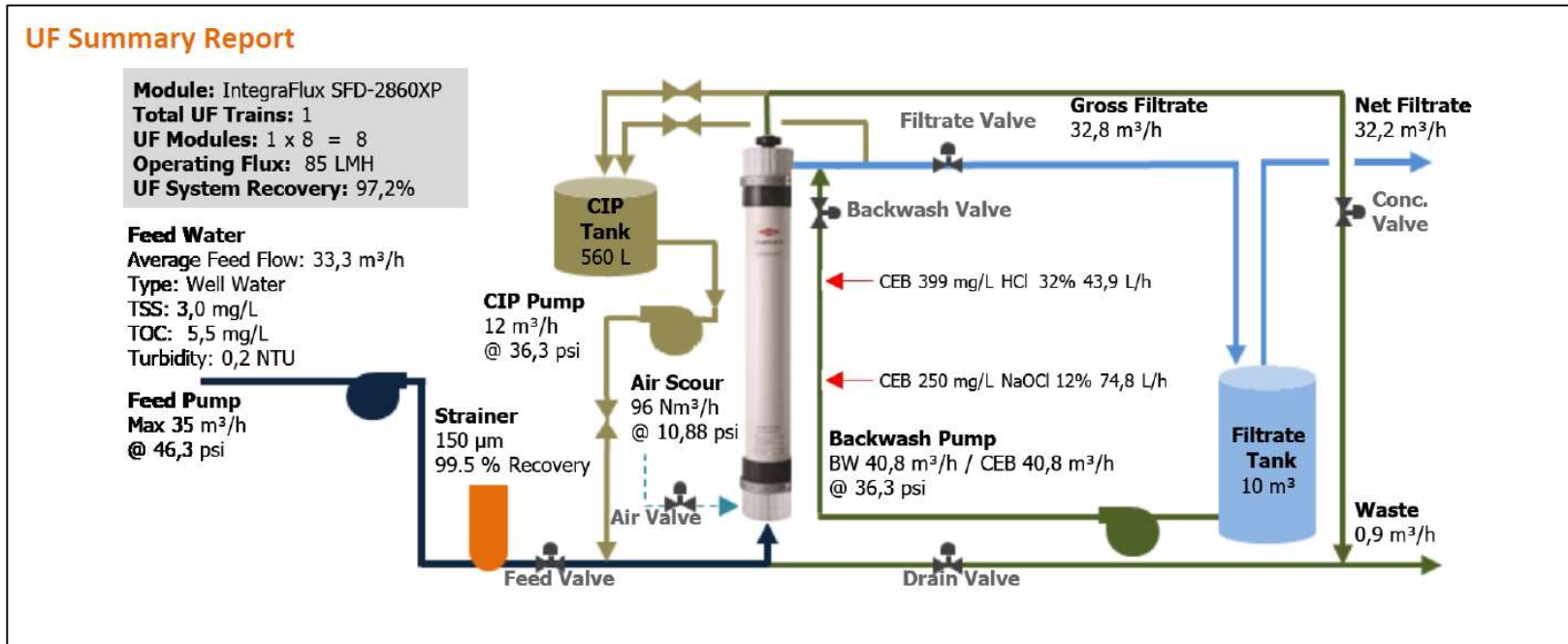
**Cuadro 27. Calidad de agua producida (esperada) por el proceso de UF.**

Parámetro	Agua de Alimentación	Agua Producida
Temperatura (°C)	27	27
Turbiedad (UNT)	0.2	< 0.1
Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)	3.0	-
Carbono orgánico total (mg/L)	5.5	5.2
SDI <sub>15</sub>	3.0	< 2.5
Sólidos Disueltos Totales TDS (mg/L)	366	366
pH	7.0	7.0

*Referencia: Valores obtenidos de la simulación con WAVE.*



Figura 24. Esquema resumen de la UF.



Referencia: Resultado para UF de la simulación con WAVE.



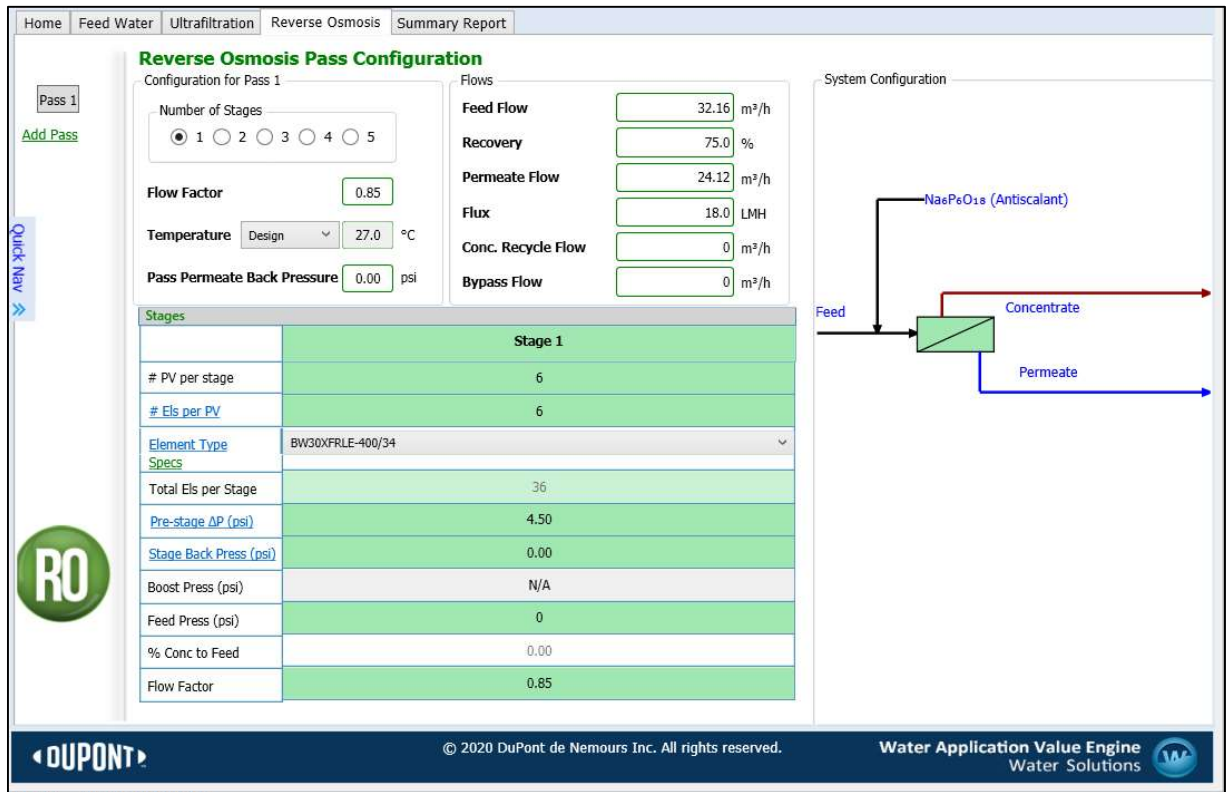
Para la simulación del proceso o la etapa de ósmosis inversa se debe seleccionar el tipo de membrana, la configuración del sistema (uno o más pasos), el número de contenedores a presión (“pressure vessels, PV”) y el número de elementos o membranas dentro de los PV. Se realizaron varias corridas con el fin de llegar a un arreglo o configuración en la cual la recuperación (agua producida/agua de alimentación) fuera optimizada.

De las corridas realizadas, la que preliminarmente se propone analizar, fue configurada de la siguiente manera:

- Un solo paso.
- 6 contenedores a presión (PV) por paso.
- 6 elementos o membranas por contenedor presurizado.
- Tipo de membrana: para agua salobre.
- Se asume se requiere de la adición de un antiincrustante al agua para proteger a las membranas.

La configuración utilizada se presenta en la figura 25. Como puede observarse, se obtiene una recuperación del 75%, para un flujo producido de 24.12 m<sup>3</sup>/h.

**Figura 25. Configuración para etapa de Ósmosis Inversa.**



*Referencia: Simulación mediante WAVE.*

Un resumen de las características principales del sistema de ósmosis inversa se presenta en el cuadro 28.

**Cuadro 28. Características principales de la etapa de ósmosis inversa.**

Parámetro/Característica	Agua de Alimentación
Número de elementos	36
Área activa total (m <sup>2</sup> )	1 338
Tipo de membrana	Para agua salobre.
Flujo por paso (m <sup>3</sup> /h)	32.2
TDS alimentación (mg/L)	328.8



Parámetro/Característica	Agua de Alimentación
Presión de alimentación (psi)	54.7
Flujo de permeado por paso (m <sup>3</sup> /h)	24.1
TDS permeado (mg/L)	19.80
Recuperación (%)	74.8
Energía específica (kWh/m <sup>3</sup> )	0.17
Dosificación de químicos (mg/L)	3.0 (Na <sub>6</sub> P <sub>6</sub> O <sub>18</sub> (100%))

*Referencia: Resultados de simulación por WAVE.*

Como puede observarse, la configuración propuesta permite obtener un flujo de permeado de 24.1 m<sup>3</sup>/h (6.7 L/s) con una concentración de Sólidos Disueltos Totales (TDS) de 19.80 mg/L, lo que indica una baja concentración de sólidos en el agua y requiere de un proceso de acondicionamiento y remineralización del agua.

Respecto a la calidad del agua producida y del concentrado (rechazo) se obtienen los valores o resultados que se presentan en el cuadro 29.

**Cuadro 29. Calidad esperada para el permeado y rechazo de las membranas de RO.**

Parámetro	Agua de Alimentación	Concentrado	Agua Producida
Amonio NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/L)	0.89	3.29	0.09
Potasio K <sup>+</sup> (mg/L)	9.06	33.89	0.79
Sodio Na <sup>+</sup> (mg/L)	30.34	113.6	2.6
Magnesio Mg <sup>+2</sup> (mg/L)	12.81	49.21	0.68
Calcio Ca <sup>+2</sup> (mg/L)	14.48	55.72	0.74
Estroncio Sr <sup>+2</sup> (mg/L)	-	-	-
Bario Ba <sup>+2</sup> (mg/L)	-	-	-
Carbonatos CO <sub>3</sub> <sup>-2</sup> (mg/L)	0.15	2.39	0.00
Bicarbonato HCO <sub>3</sub> <sup>-2</sup> (mg/L)	193.0	726.6	13.64
Nitratos NO <sub>3</sub> <sup>-2</sup> (mg/L)	-	-	-



Parámetro	Agua de Alimentación	Concentrado	Agua Producida
Fluoruros F <sup>-</sup> (mg/L)	0.32	1.20	0.03
Cloruros Cl <sup>-</sup> (mg/L)	6.73	26.23	0.23
Bromuro Br <sup>-</sup> (mg/L)	-	-	-
Sulfatos SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> (mg/L)	-	-	-
Fosfatos PO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> (mg/L)	-	-	-
Sílice SiO <sub>2</sub> (mg/L)	60.91	240.7	0.99
Boro B (mg/L)	-	-	-
Dióxido de carbono CO <sub>2</sub> (mg/L)	26.67	28.33	26.79
Sólidos Disueltos totales TDS (mg/L)	328.7	1 254	19.80
Conductividad (µS/cm)	321	1 153	23
pH	7.0	7.5	5.9

*Referencia: Simulación realizada en WAVE.*

Como puede observarse del cuadro 29, la calidad del agua producida o permeado es muy buena con respecto a lo que a VMA se refiere. Es probable que se requiera de un ajuste de pH y aporte de algunos minerales (remineralización) para que no sea corrosiva y se agreguen minerales buenos para la salud. Respecto al agua de rechazo o concentrado, los valores preliminarmente obtenidos, no parecen exceder parámetros regulados en el Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales, por lo que es posible que puedan ser vertidos sin tratamiento previo. Lo anterior, no exime de monitorear la calidad, hacer reportes operacionales ni de realizar mejoras en caso de que sea necesario.

La simulación realizada arroja varias alertas que deben ser tomadas en consideración en caso de que se tome la decisión de tratar el agua a través del uso de membranas; entre ellas se destacan:



- Incumplimientos del flujo de concentrado para los últimos elementos dentro de los PV.
- Recuperación elevada (más de lo recomendado) para los últimos elementos dentro de los PV.
- Valor obtenido por el Índice de Langelier  $> 0$ .
- Porcentaje de saturación de la sílice  $> 100\%$ .

Es importante destacar que la propuesta que se presenta no es un diseño definitivo y que, en caso de decidir utilizarla, el sistema debe ser diseñado de forma definitiva. La propuesta se realiza con la intención de mostrar que el uso de membranas es una alternativa más a ser analizada, y que la información sea útil para los tomadores de decisiones.

Respecto a los ajustes o acondicionamiento que debe realizarse al agua para optimizar el desempeño de las membranas, se presentan en el cuadro 30 algunos resultados de interés obtenidos mediante la simulación. Estos resultados están relacionados con el Índice de Langelier, porcentaje de saturación de la sílice y otros más que ya fueron comentados.

**Cuadro 30. Ajustes químicos del proceso de RO.**

Parámetro	Agua de Alimentación	Concentrado
pH	7.0	7.5
Índice de saturación de Langelier	-1.08	0.52
Índice de estabilidad Stiff & Davis	-0.15	0.97
TDS (mg/L)	328.7	1 254
CaSO <sub>4</sub> (%saturación)	-	-
BaSO <sub>4</sub> (%saturación)	-	-
SrSO <sub>4</sub> (%saturación)	-	-



Parámetro	Agua de Alimentación	Concentrado
CaF <sub>2</sub> (%saturación)	0.72	9.8
SiO <sub>2</sub> (%saturación)	47.2	186.6
Mg(OH) <sub>2</sub> (%saturación)	-	-

Una recomendación muy importante para estos sistemas es la evaluación de productos químicos para el acondicionamiento del agua, entre ellos: antiincrustantes, ajustes de pH, agentes reductores y otros. En el siguiente enlace se presenta el documento de salida (resultado) de la [simulación](#) con el software WAVE.

### 3.8.2.2 Configuración del sistema de tratamiento por membranas.

De manera preliminar, se puede indicar que una posible configuración del sistema de tratamiento incluiría al menos las siguientes etapas:

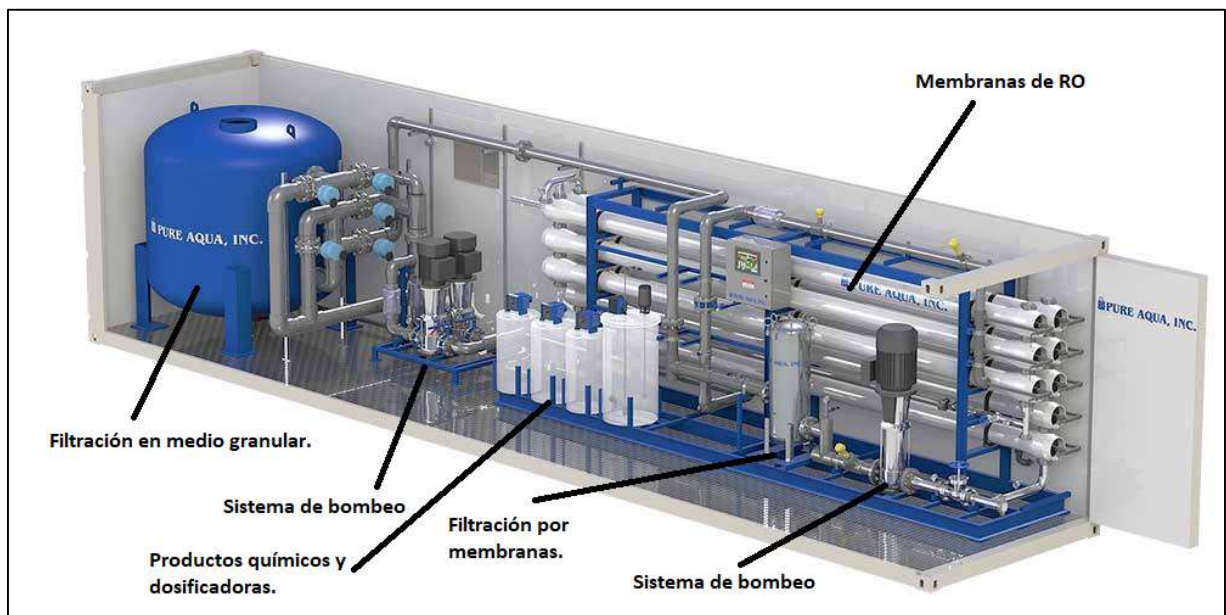
1. Extracción de agua del pozo.
2. Sistema de filtración por discos auto limpiantes o similar.
3. Sistema de microfiltración y/o ultrafiltración, que podría incluir:
  - a. Membranas
  - b. Tanque para agua de filtrado para retrolavados.
  - c. Tanque para CIP.
  - d. Equipos para adicionar aire.
  - e. Equipos hacer los CEB y CIP.
4. Acondicionamiento del agua y equipos necesarios para realizar esta operación; por ejemplo, dosificación de antiincrustantes.
5. Sistema de bombeo para elevar presión hacia membranas de NF u RO.



6. Sistema de ósmosis inversa, que incluye:
  - a. Membranas.
  - b. Sistema para CIP.
  - c. Sistema para retrolavados y CEB.
7. Acondicionamiento del agua: ajuste de pH, remineralización y otros.
8. Oxidación/desinfección: dosificación de cloro para oxidar el H<sub>2</sub>S y el amonio (en caso de no ser removido antes).
9. Cisterna de agua tratada: para tiempo de contacto de oxidación y desinfección. Similar al caso del apartado 3.8.1.5.

Es importante indicar que el sistema de UF podría ser sustituido por filtración presurizada en medio granular y/o microfiltración; lo anterior quedará a criterio del diseñador y del ensamblador del sistema. A modo de ejemplo representativo, se presenta en la figura 26 un esquema con los principales procesos de tratamiento de agua salobre o salada. La configuración propuesta en esta sección del documento es similar a la que se muestra.

**Figura 26. Esquema representativo de sistema de tratamiento de agua salobre o salada.**



Referencia: Tomado de [www.pureaqua.com](http://www.pureaqua.com) (2021).

En la figura se muestra un sistema de tratamiento de RO móvil, que se integra dentro de un contenedor. Los principales componentes son filtración en medio granular, sistema de membranas de UF o microfiltración (MF), sistema de bombeo y membranas de RO. Adicionalmente, se pueden observar los contenedores de productos químicos a dosificar, como, por ejemplo: antiincrustante, productos para CIP y CEB.

### 3.8.2.3 Costo de capital de sistemas de membranas.

En el año 2020 el área funcional de Investigación Aplicada realizó un estudio de mercado sobre sistemas de potabilización modulares, ensamblados dentro de contenedores y para un caudal aproximado de 10 L/s. Algunas de las propuestas recibidas se formularon basadas en sistema similares al estudiado y mencionado: sistema de filtración en medios granulares, membranas de UF y/o MF y membranas de RO. Los contaminantes analizados en el estudio de mercado eran: nitratos, calcio, sulfatos y plaguicidas.



De la información de la investigación de mercado mencionada, se puede obtener un costo de capital (CAPEX) para un sistema de potabilización similar al propuesto, pero para 10 L/s; los costos se encuentran entre los \$300 000 a los \$520 000. Como el caudal requerido (6.7 L/s) por el proyecto de Aguas Frías es menor a los 10 L/s (estudio de mercado) y como es posible que no se requiere un sistema dentro de un contenedor, podría pensarse que los costos de un sistema por membranas son muy similares a los que se obtendrían para un sistema de potabilización mediante medios granulares (apartado 3.8.1) para el caso en estudio (\$235 000 a \$395 000).

Respecto a los costos de instalación y puesta en marcha de los sistemas, las empresas estimaron un requerimiento de \$8 000 a \$38 000; lo anterior por cuanto los sistemas vienen para ser conectados a la fuente de agua, tipo “plug and play”.

#### **3.8.2.4 Costos de operación y mantenimiento de sistemas con membranas.**

Para la estimación de los costos de operación y mantenimiento, se divide el costo total en los siguientes componentes principales.

1. Mano de obra. Se estima es igual al de la propuesta en medios granulares (apartado 3.8.1); ¢1 160 922 por mes.
2. Cargas sociales. Igual al de la propuesta en medios granulares (apartado 3.8.1); ¢487 578 por mes.
3. Energía eléctrica. El software WAVE realiza una estimación de consumo de energía para el sistema de potabilización. Se estima en 43.74 kWh/d para la UF y en 101.3 kWh/d para la RO; en total serían 145 kWh/d. Para un costo del kWh de ¢110/kWh se obtienen un total de ¢15 954/día para un total de ¢486 000 por mes.
4. Productos químicos. El software WAVE realiza un estimado del consumo de productos químicos, para la UF se estima en \$0.32/d y para la RO en \$2.3/d.



Como estos costos son para un mercado en EEUU, se estima el mismo se puede duplicar para Costa Rica; con lo cual obtendríamos un costo de \$5.24/d para un total de \$157 (¢96 000) por mes. Adicionalmente a los productos químicos del proceso, se debe agregar el cloro para la desinfección (en este caso). Si se estima una dosificación de 2 mg/L, se requieren de aproximadamente 4.8 L/d de solución de hipoclorito de sodio al 12%. El costo mensual de este producto se estima en ¢57 000 aproximadamente. En total, se estima un costo de ¢153 000.

5. Monitoreo. Se estima es igual al costo estimado para el tratamiento por medios granulares (apartado 3.8.1); de ¢533 520 por mes.
6. Transporte y recolección de residuos. En este caso se considera que el rechazo del agua de la membrana no debe ser tratado y puede ser dispuesto en un cuerpo de agua (esto debe ser verificado por el diseñador del sistema) y el costo de la disposición sería el canon de vertido. Adicionalmente, los residuos de las limpiezas de las membranas y de las pruebas o los reactivos utilizados, deben ser tratados y dispuestos según la legislación, pero no se incluye su costo en este análisis.
7. Reemplazo de las membranas. Según lo que se ha investigado, las membranas bien diseñadas y operadas pueden llegar a durar entre 3 a 5 años. Adicionalmente, de una búsqueda rápida en internet, se encuentra que una membrana de RO de la empresa Dupont (<https://wtech1.com/dupont-dow/dow-memb/r-ro-membrane-filmtec.html>) puede costar entre \$400 a \$900. Suponiendo que debe importarse a Costa Rica, se asume que el costo sería de \$1 500 por membrana. Al ser 36 membranas (elementos) y reemplazarse cada 36 meses, podríamos asumir que el costo de reemplazo es de 1 membrana al mes (\$1 500/mes - ¢915 000/mes).



8. Reemplazo de material filtrante o membranas de UF. Para estimar este costo se asume que el material granular se reemplaza cada 3 años y tiene un costo de reemplazo igual al del MnO<sub>2</sub> en el apartado de tratamiento por medios granulares (3.8.1.9.8), de ¢186 000.


En el cuadro 31 se presenta un resumen de los principales costos asociados al tratamiento por membranas.

**Cuadro 31. Costos asociados al tratamiento por membranas.**

Aspecto	Costo mensual (¢)
Mano de obra	1 160 922
Cargas sociales	487 587
Energía eléctrica	486 000
Productos químicos	153 000
Pruebas presuntivas	411 480
Pruebas acreditadas	122 040
Reemplazo de membranas de RO	915 000
Reemplazo MnO <sub>2</sub>	186 000
Total, mensual	3 922 029

*Referencia: Elaboración propia.*

Como puede observarse, el costo de operación y mantenimiento de este sistema puede encontrarse cercanos a los ¢4.0 millones por mes; donde los costos más importantes son las cargas por mano de obra y cargas sociales como el reemplazo de las membranas de RO; el costo por consumo eléctrico es muy importante también. Si se estima el costo de operación y mantenimiento de la PP por metro cúbico de agua producida, se obtiene un valor de ¢453/m<sup>3</sup> de agua producida. Lo anterior solamente incluye los costos de operar la PP.

	<b>Informe técnico</b>		Página <b>116</b> de <b>124</b>
	<b>CÓDIGO:</b> GTE-106-02-F3	<b>N° de Versión:</b> 01	

#### **4 Conclusiones.**

1. Con alguna frecuencia, el agua que llega a los hogares de los abonados del sistema de Aguas Frías presenta color, generando desconfianza de la calidad de esta.
2. El olor a “huevo podrido” en aguas subterráneas, se debe a la acción de microorganismos sobre los sulfatos (reducción anaeróbica), formando sulfuros como el ácido sulfhídrico (H<sub>2</sub>S). Según las determinaciones realizadas, el olor a “huevo podrido” del agua de la ASADA de Aguas Frías está relacionado con una concentración de H<sub>2</sub>S cercana a 0.01 y 0.02 mg/L.
3. Según la literatura, la presencia de geosmina y el MIB en agua, es la responsable de algunos olores; particularmente el de “tierra mojada”. Por esta razón, se considera que la afectación en el agua de Aguas Frías no se debe a estos contaminantes.
4. Se detecta la presencia de materia orgánica natural en el agua del pozo de la ASADA, a través de las determinaciones de COT (2.46 a 5.70 mg/L), COD (2.09 a 5.35 mg/L) y UV<sub>254</sub>. La presencia de materia orgánica puede impartir color al agua, promover el desarrollo de microorganismos y en algunas situaciones al reaccionar con desinfectantes puede generar Subproductos de la Desinfección (como en la prueba realizada y documentada).
5. La presencia de hierro y manganeso en el agua para consumo humano de la ASADA de Aguas Frías, en ciertas concentraciones y bajo ciertas circunstancias (condiciones oxidantes) puede impartir color y turbiedad al agua. Según las pruebas presuntivas realizadas durante 72 horas de funcionamiento del pozo y las determinaciones realizada por el LNA, la concentración de hierro y manganeso del agua del pozo son cercanas a 0.13 y 0.06 mg/L respectivamente.



6. En muchas ocasiones la presencia de hierro y manganeso se acompaña por la presencia de bacterias del hierro, las cuales catalizan la oxidación del hierro y manganeso y pueden generar biopelículas en componentes de los acueductos. Se considera que las “costras” o “babas” que se forman en las tuberías del sistema de distribución (situación descrita por funcionarios de la ASADA) son biopelículas como las descritas.
7. En algunos análisis de calidad de agua del pozo de la ASADA, se registra la presencia de amonio en concentraciones superiores al VMA establecido por el RCAP vigente. Para poder oxidar el amonio se requiere de una cantidad considerable de oxidante y de tiempo de contacto.
8. La cuantificación de H<sub>2</sub>S en agua para consumo se debe realizar en sitio y en caso de que se requiera analizar en laboratorio, se debe preservar la muestra según las recomendaciones del Standard Methods.
9. El agua del pozo de la ASADA de Aguas Frías contiene sustancias reducidas que demandan de cantidades importantes de cloro para ser oxidadas. De la prueba puntual realizada se obtiene que, para esas condiciones analizadas, se requirieron de aproximadamente 8 mg/L de NaOCl para llegar al punto de quiebre del agua.
10. Las muestras de agua sucia tomadas en distintos puntos de purga o limpieza de la red de distribución contienen partículas sólidas y concentraciones importantes de hierro (1 050, 3 614 y 6 738 µg/L), manganeso (441, 966 y 3 442 µg/L) y aluminio (200, 2 261 y 1 822 µg/L); adicionalmente, presentan importantes valores de turbiedad (desde 2.14 hasta 20.1 UNT) y color (desde 22 hasta 145 UPt-Co).
11. En este informe se presentan dos tecnologías existentes para el tratamiento de las afectaciones a la calidad del agua de la ASADA de Aguas Frías; la primera a través del uso de materiales granulares y la segunda a través del uso de membranas.



12. Para la opción de potabilización mediante el uso de materiales granulares y con el fin de evitar la formación de subproductos de la desinfección/oxidación, se propone remover la mayor cantidad posible de NOM del agua (precursor) a través del uso de GAC. Posteriormente, a través de la aplicación de cloro, tiempo de contacto y el uso de un material catalítico de filtración como el  $MnO_2$ , se puede oxidar el amonio a nitratos o  $N_2$ , el  $H_2S$  a sulfatos y el hierro y manganeso a óxidos metálicos. Cualquier sólido que se forme podrá ser retenido en el medio filtrante. Esto mejorará la calidad del agua.
13. Para la opción mediante el uso de membranas, se propone utilizar un sistema que cuente con una filtración de partículas previo a las membranas, una etapa de micro o ultrafiltración, acondicionamiento del agua y la remoción materia orgánica y sólidos disueltos a través de la ósmosis inversa. El  $H_2S$  y lo que pudiera quedar de amonio en el agua, podrán ser oxidados a sulfatos y nitratos respectivamente a través de la cloración del agua y el tiempo de contacto en la cisterna.
14. Se estima que la inversión de capital para un sistema de potabilización para el agua de la ASADA de Aguas Frías puede encontrarse entre los \$234 500 y los \$395 300; ya sea mediante medios granulares o mediante el uso de membranas.
15. Se estima que el costo de operación y mantenimiento del sistema de potabilización mediante el uso de materiales granulares puede ser cercano a los  $\phi 6.0$  millones por mes; para una producción de 6,7 L/s durante 12 horas al día. El costo del  $m^3$  de agua tratada se estima en  $\phi 685$ .
16. Se estima que el costo de operación y mantenimiento del sistema de potabilización mediante el uso de membranas puede ser cercano a los  $\phi 4.0$  millones por mes; para una producción de 6,7 L/s durante 12 horas al día. El costo del  $m^3$  de agua tratada se estima en  $\phi 453$ .



17. El costo de instalación y puesta en marcha de los sistemas puede encontrarse entre los \$8 000 a los \$38 000.

## 5 Recomendaciones.

Para la Subgerencia de Sistemas Delegados:

- 1 Promover la participación de la ASADA de Aguas Frías en el programa de Sello de Calidad Sanitaria.
- 2 Evaluar las distintas alternativas existentes para mejorar la calidad del agua que reciben los abonados de la ASADA de Aguas Frías; entre ellas: cambio de fuente de abastecimiento, integración de sistemas, tratamiento del agua, etc.
- 3 Promover la realización de los estudios que sean requeridos, para determinar si las actividades agropecuarias que se desarrollan en la vecindad del pozo afectan o pueden llegar a afectar la calidad del agua para consumo humano.
- 4 Poner a funcionar adecuadamente el sistema de desinfección del agua del pozo de la ASADA de Aguas Frías, considerando la demanda real de cloro del agua de esta fuente.
- 5 Evaluar periódicamente la calidad del agua del sistema, con respecto a los parámetros de olor, amonio, potasio, color, coliformes fecales, *E. coli*, *Clostridium perfringens*, turbiedad, materia orgánica (COT, COD, UV<sub>254</sub>, SUVA) y la posible generación de subproductos de la desinfección en el sistema de distribución. Lo anterior, adicional a lo que se debe monitorearse periódicamente según el RCAP. Este monitoreo permitirá identificar la eficiencia del sistema de desinfección, si se remueve el olor a través del uso del cloro, si se forman SPD y en qué concentraciones, y si se mejora o empeora la calidad del agua con respecto al tema del color. Adicionalmente, en el caso del potasio que se encuentra cercano al VMA, esto permitirá tomar las consideraciones del caso para cualquier solución. Es importante recordar que el sistema de tratamiento de agua mediante medios



granulares no eliminaría el potasio del agua; el sistema mediante membranas sí podría hacerlo.

- 6 Fomentar la realización de purgas de limpieza de la red de distribución de agua, lo anterior para disminuir las molestias por presencia de color y sólidos en el agua distribuida.
- 7 Coordinar con el LNA la realización de análisis de metales pesados en muestras de agua sucia, específicamente importante es verificar si en las muestras aparece de nuevo la presencia de mercurio; lo anterior para tomar las medidas que sean requeridas en caso de ser necesario. Este aspecto es de suma importancia y se recomienda se realice lo antes posible; basado en lo expuesto en los apartados 3.7.3 y 3.7.4.
- 8 En caso de que se decida tratar el agua mediante el uso de materiales granulares, se recomienda promover la realización de pruebas a escala, ya sean pruebas piloto o RSSCT, para evaluar el tipo y la vida útil del carbón activado granular para remover precursores de SPD bajo las condiciones existentes y para determinar los parámetros de diseño como son EBCT y velocidad de flujo. Adicionalmente, se puede valorar la posibilidad de cambiar el orden de los procesos para evaluar el sistema de tratamiento como un biofiltro, el orden podría ser: adición de ozono,  $MnO_2$ , GAC y cloración. Los valores utilizados en la memoria de cálculo y que se presentan en este documento, son recomendaciones teóricas que debe ser verificadas y validadas en pruebas a escala.
- 9 En caso de que se decida tratar el agua mediante el uso de membranas, se recomienda promover la realización de pruebas a escala para evaluar la eficiencia de las mismas respecto a los contaminantes en estudio, la vida útil de las membranas y los productos químicos por utilizar.
- 10 Valorar la estrategia a seguir para que previo a la construcción definitiva de un sistema de potabilización, se realice un pilotaje adecuado del esquema de



tratamiento planteado. Todo esto podrá generar parámetros de diseño que pueden ser insumo para el diseño definitivo del sistema de potabilización y gestión de residuos (en caso de ser necesario), en caso de que esta sea la alternativa seleccionada por SD.

- 11 Realizar un estudio de mercado detallado para determinar el costo de capital y de operación y mantenimiento del sistema. Lo anterior, en caso de que se decida implementar el sistema de tratamiento del agua de la ASADA de Aguas Frías.
- 12 Garantizar la sostenibilidad financiera de la ASADA para la correcta operación y mantenimiento del sistema. Además, se debe capacitar a los funcionarios de la ASADA en la operación y mantenimiento de los procesos de potabilización y gestión de residuos. De acuerdo con la manera en que se gestionen los residuos, así se determina si se requiere elaborar reportes operacionales y obtener los permisos para vertidos. Lo anterior, en caso de que se decida implementar el sistema de tratamiento del agua de la ASADA de Aguas Frías.
- 13 Incluir en un eventual contrato de la PP, las capacitaciones de los funcionarios de la ASADA, incluyendo el tema de seguridad ocupacional para la operación y mantenimiento del sistema. Se debe tomar en cuenta las recomendaciones para el manejo seguro del GAC, mismo que al humedecerse puede provocar una atmósfera deficiente en oxígeno en lugares cerrados (en caso de que se requiera su uso). Lo anterior, debe evaluarse también para el sitio donde se podría instalar el sistema de tratamiento.
- 14 Gestionar los residuos de las pruebas presuntivas para control operativo del sistema de potabilización de manera adecuada y según las regulaciones existentes. Los reactivos poseen fichas técnicas y hojas de seguridad. Lo anterior en caso de decidir implementar la PP.




Para la UEN Investigación y Desarrollo:

- 1 Promover el desarrollo de capacidades para evaluar materiales adsorbentes y definir los criterios o parámetros de diseño de estos.
- 2 Promover el desarrollo de capacidades para evaluar sistemas de potabilización o tratamiento de aguas a través de membranas.
- 3 Adquirir y evaluar reactivos para monitoreo de H<sub>2</sub>S en agua para consumo.

Para el Laboratorio Nacional de Aguas.

- 1 Realizar evaluación sanitaria del sistema de abastecimiento de la ASADA de Aguas Frías.
- 2 Crear una estrategia que permita poder determinar NOM (en agua a través de las cuantificaciones de COT, COD, UV<sub>254</sub> y SUVA), H<sub>2</sub>S, SPD, bacterias del hierro y bacterias sulfato reductoras en aguas para consumo.

	<b>Informe técnico</b>		Página <b>123</b> de <b>124</b>
	<b>CÓDIGO:</b> GTE-106-02-F3	<b>N° de Versión:</b> 01	

## **6 Referencias bibliográficas.**

André, N. Origin and Fate of Odorous Metabolites, 2-Methylisoborneol and Geosmin, in a Eutrophic Reservoir. Indiana. Estados Unidos de America. 2019.

Crittenden, R; et al. MWH's Water Treatment: Principles and Design. Third Edition. John Wiley & Sons, Inc. Estados Unidos de América. 2012.

Edwald, J; et al. Water Quality and Treatment. A Handbook on Drinking Water. Sixth Edition. American Water Works Association. Denver, Colorado. Estados Unidos de America. 2011.

Environmental Protection Agency. Drinking Water Guidance on Disinfection By-Products. Advice Note N° 4. Version 2. Irlanda. 2012.

Hackett, G; et al. Iron Bacteria. Ocurrence, Problems and Control Methods In Water Wells. US Army Corps of Engineers. Waterways Experiment Station. Ohio. Estados Unidos de America. 1985.

Lazo, A; et al. Remoción de hierro y manganeso en agua para consumo humano. Investigación Aplicada. Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados. Costa Rica. 2018.

Postwana, A; et al. Best Practice Guide on the Control of Iron and Manganese in Water Supply. International Water Association IWA Publishing. London, United Kingdom. 2013.

Vahala, R. Two-step Granular Activated Carbon Filtration in Drinking Water. Dissertation for the degree of Doctor of Science in Technology. Helsinki. Finland. 2002.

World Health Organization (WHO). Guidelines for Drinking Water Quality. Fourth Edition. Suiza. 2017.



Zuñiga, L. Correo electrónico. Asunto: Amonio. Pruebas realizadas en el Laboratorio Nacional de Aguas. Costa Rica. 2018.