

**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA**

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AMBIENTAL

VALPARAÍSO CHILE



**ESTUDIO TÉCNICO - ECONÓMICO DEL PROCESO  
DE ELECTROCOAGULACIÓN PARA LA REMOCIÓN  
DE ARSÉNICO DESDE AGUAS NATURALES**

**Francisca Tamara Ovalle Jiménez**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL QUÍMICA

Profesor guía:

Dra. Andrea Lazo

Profesor co-refente:

Dr. Henrik Hansen

2024



## Resumen

El arsénico es un contaminante crítico en aguas naturales debido a su alta toxicidad y sus efectos adversos sobre la salud humana y el medio ambiente. Si bien, a nivel mundial, las normativas para agua potable limitan la concentración de arsénico en el agua, muchas personas dependen de aguas que provienen de pozo o sistemas de agua potable rural. Por anterior, es importante el desarrollo y evaluación de nuevas tecnologías que permitan remover el arsénico del agua, principalmente en su valencia As(III) que es la más tóxica de las formas inorgánicas. Este estudio aborda la problemática del tratamiento de agua en contextos rurales mediante la implementación de una planta de electrocoagulación en Colchane, una localidad que enfrenta desafíos significativos por su lejanía y la falta de acceso a agua potable segura.

El sistema propuesto se basa en parámetros optimizados que incluyen una densidad de corriente de 40 A/m<sup>2</sup>, un pH de 6,5 y una distancia entre electrodos de 1,5 cm. La capacidad de la planta es de 57 m<sup>3</sup>/día e incluye las etapas de pretratamiento, electrocoagulación, filtración y cloración, logrando que el agua tratada cumpla con la normativa chilena NCh409 para agua potable.

En términos económicos, se evaluaron los costos de inversión, operación y mantenimiento. El análisis indica un Valor Actual Neto (VAN) positivo de \$27.207.070 CLP, una Tasa Interna de Retorno (TIR) del 23%, y un periodo de recuperación de la inversión (payback) de 7 años. El costo por metro cúbico de agua tratada se estimó en 4.900 CLP/m<sup>3</sup>, lo que, aunque superior al promedio comercial, se considera justificado por la necesidad crítica de la comuna.

El análisis de sensibilidad muestra que la viabilidad económica del proyecto mejora con aumentos en la producción y ajustes en el precio del agua. Así, con un incremento en la producción del 2% anual, el proyecto alcanza una rentabilidad sostenida, mientras que un el punto de equilibrio considera un precio de 4.647 CLP/m<sup>3</sup>. A precios superiores a 4.700 CLP/m<sup>3</sup>, el proyecto genera un VAN positivo y una TIR superior al 11%. Esto proporciona información clave sobre cómo las variaciones en estos parámetros afectan el desempeño económico del sistema.

A partir del estudio se concluye que la electrocoagulación es una solución técnicamente factible y económicamente viable para la remoción de arsénico en comunidades rurales como Colchane. Además, establece una base para la implementación de tecnologías sostenibles en el tratamiento de agua, promoviendo el acceso equitativo al recurso hídrico y la mejora en la calidad de vida de las comunidades. A futuro, se recomienda integrar energías renovables y optimizar aún más los parámetros operativos para reducir costos y aumentar la sostenibilidad del sistema.



## Agradecimientos

Quiero comenzar agradeciendo a mi mamá, Verónica Jiménez, quien siempre ha sido mi mayor pilar de apoyo. Su comprensión y paciencia infinita, especialmente durante los momentos de estrés y dificultad a lo largo de mi periodo universitario, fueron fundamentales para que pudiera seguir adelante. A pesar de las exigencias y desafíos que enfrenté, ella siempre estuvo a mi lado, brindándome su motivación incondicional y recordándome que todo esfuerzo tiene su recompensa. También quiero expresar mi más profundo agradecimiento a mis abuelos, quienes han sido como mis segundos padres y han estado presentes en cada etapa de mi vida. Su cariño, apoyo incondicional y enseñanzas me han acompañado siempre. A mis hermanos, gracias por su compañía y por ser una fuente constante de motivación y alegría a lo largo de este camino. Extiendo mi gratitud a toda mi familia en general, por sus palabras de aliento y el amor que siempre me han brindado. Su presencia, ha sido un recordatorio constante de que nunca estoy sola. Quiero también dedicar un pensamiento especial a aquellos que ya no están físicamente con nosotros, pero cuyo recuerdo sigue vivo en mi corazón.

Quiero agradecer a mi mejor amiga, quien ha estado a mi lado en cada momento importante de mi vida, brindándome su apoyo, confianza y alegría incondicional. A mis amigos del colegio, gracias por seguir siendo parte de mi vida, a pesar de los años y los cambios que cada uno ha experimentado. Es un privilegio contar con un grupo de personas tan valiosas que, a pesar del tiempo, siguen siendo un pilar importante en mi camino.

Agradecer también, a mi mejor amiga de la universidad, quien se convirtió en una compañera importante a lo largo de este camino. Su apoyo constante y sus consejos hicieron que este periodo fuera mucho más llevadero, sin duda, su amistad fue el mejor regalo que me dejó la universidad. A los amigos que conocí durante estos años, gracias por ser parte de esta experiencia única. Cada trabajo en grupo y momento compartido dejó una huella en este proceso. Su compañía no solo me ayudó a superar los retos académicos, sino que también hizo que esta etapa estuviera llena de recuerdos y experiencias inolvidables.

Agradecer a mi pareja, por este último año, en el que se convirtió en un pilar fundamental durante este proceso. Gracias por tu apoyo, por escucharme y por tu paciencia para acompañarme en cada etapa de este proyecto.

Por último, agradecer a mi profesora guía, por su apoyo y orientación a lo largo de este proceso.

A todos ustedes, los quiero mucho y los llevo siempre en mi corazoncito.



# Índice de contenido

<i>Resumen</i> .....	2
<i>Agradecimientos</i> .....	3
<i>Introducción</i> .....	8
<i>Objetivo general</i> .....	9
<i>Objetivos específicos</i> .....	9
<b>1 Antecedentes</b> .....	<b>10</b>
<b>1.1 Arsénico en la actualidad</b> .....	<b>10</b>
<b>1.2 Efecto del arsénico en la salud</b> .....	<b>11</b>
<b>1.3 Contaminación de aguas con arsénico</b> .....	<b>12</b>
1.3.1 Contaminación en aguas superficiales .....	14
1.3.2 Contaminación en aguas subterráneas .....	15
1.3.3 Contaminación de arsénico en Chile.....	18
<b>1.4 Tecnologías de remoción de arsénico</b> .....	<b>21</b>
1.4.1 Adsorción.....	21
1.4.2 Coagulación-floculación.....	22
1.4.3 Intercambio iónico .....	23
1.4.4 Separación a través de membranas: .....	24
1.4.5 Electrocoagulación.....	26
1.4.6 Comparación de tecnologías .....	27
<b>1.5 Normativa en Chile</b> .....	<b>28</b>
<b>2 Estudio Técnico</b> .....	<b>30</b>
<b>2.1 Definición de la producción</b> .....	<b>30</b>
2.1.1 Cantidad de agua a tratar .....	31
2.1.2 Calidad de agua a tratar .....	32
<b>2.2 Proceso de electrocoagulación</b> .....	<b>33</b>
2.2.1 Teoría del proceso.....	33
2.2.2 Electrocoagulación.....	34



<b>2.3</b>	<b>Definición de parámetros.....</b>	<b>37</b>
2.3.1	Elección del electrodo.....	37
2.3.2	pH .....	38
2.3.3	Densidad de corriente .....	39
2.3.4	Distancia entre los electrodos .....	39
2.3.5	Voltaje aplicado .....	40
<b>2.4</b>	<b>Diagrama del proceso.....</b>	<b>41</b>
<b>2.5</b>	<b>Descripción del proceso .....</b>	<b>41</b>
<b>2.6</b>	<b>Balance de masa .....</b>	<b>43</b>
<b>2.7</b>	<b>Dimensionamiento de equipos.....</b>	<b>44</b>
2.7.1	Equipo de desbaste.....	44
2.7.2	Celdas de electrocoagulación.....	44
2.7.3	Ecuador .....	47
2.7.4	Filtro .....	48
2.7.5	Estanque de cloración .....	48
2.7.6	Bombas .....	49
<b>2.8</b>	<b>Servicios.....</b>	<b>51</b>
<b>2.9</b>	<b>Layout de la planta.....</b>	<b>52</b>
<b>3</b>	<b><i>Evaluación económica.....</i></b>	<b>54</b>
<b>3.1</b>	<b>Base para la evaluación económica.....</b>	<b>54</b>
3.1.1	Esperanza de vida del proyecto .....	54
3.1.2	Proyecciones de producción .....	54
3.1.3	Precio de venta.....	54
3.1.4	Antecedentes financieros (impuestos, alternativas de financiamiento, tasas de descuento) .....	55
3.1.5	Moneda utilizada para la evaluación .....	55
3.1.6	Materias primas y Servicios y sus proyecciones.....	56
3.1.7	Criterios de devaluación.....	56
<b>3.2</b>	<b>Estimación CAPEX .....</b>	<b>57</b>
3.2.1	Lista de inversiones .....	58
3.2.2	Detalles del costo financiero .....	59
3.2.3	Capital de trabajo.....	60
<b>3.3</b>	<b>Estimación OPEX.....</b>	<b>60</b>



<b>3.4</b>	<b>Flujo de caja.....</b>	<b>63</b>
<b>3.5</b>	<b>Indicadores económicos del proyecto .....</b>	<b>64</b>
3.5.1	VAN.....	64
3.5.2	TIR.....	64
3.5.3	PayBack .....	65
<b>3.6</b>	<b>Análisis de sensibilidad .....</b>	<b>65</b>
3.6.1	Análisis de sensibilidad según precio por m <sup>3</sup> de agua. ....	65
3.6.2	Análisis de sensibilidad según aumento de producción .....	66
	<b>Conclusiones y recomendaciones .....</b>	<b>68</b>
	<b>Referencias .....</b>	<b>70</b>
	<b>Anexos .....</b>	<b>74</b>

## Índice de Figuras

<i>Figura 1. Especies de arsénico según pH (Lillo, 2008).....</i>	<i>13</i>
<i>Figura 2. Presencia de arsénico en los recursos hídricos de los países latinoamericanos: (a) aguas subterráneas, (b) aguas superficiales y (c) agua potable (Rodriguez, et al., 2024).....</i>	<i>14</i>
<i>Figura 3. Distribución de arsénico en el mundo (Smedley, 2002). ....</i>	<i>16</i>
<i>Figura 4. Población afectada por concentraciones de arsénico en aguas subterráneas (Podgorski &amp; Berg, 2020)..</i>	<i>17</i>
<i>Figura 5. Predicción global del arsénico en aguas subterráneas (Podgorski &amp; Berg, 2020). ....</i>	<i>17</i>
<i>Figura 6. Probabilidad global modelada de contaminación geogénica por arsénico en aguas subterráneas (Amini, et al., 2008).....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 7. Distribución de As Norte de Chile (Mella, 2021). ....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 8. Distribución de As zona Centro de Chile (Mella, 2021).....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 9. Distribución de As en zona Sur de Chile (Mella, 2021). ....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 10. Proceso de adsorción. ....</i>	<i>22</i>
<i>Figura 11. Proceso de coagulación-floculación. (Calderón, et al., 2010).....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 12. Proceso intercambio iónico. ....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 13. Proceso de separación a través de membranas (Calderón, et al., 2010). ....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 14. Límites de separación para diferentes membranas. ....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 15. Proceso de electrocoagulación (Calderón, et al., 2010). ....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 16. Ubicación geográfica de comuna de Colchane, I Región Tarapacá.....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 17. Gráfico % de viviendas sin acceso a servicios básicos en Región de Tarapacá (Gobierno Regional Tarapacá, 2023). ....</i>	<i>31</i>



Figura 18. Distribución de arsénico en aguas subterráneas en zona Norte de Chile. ....	32
Figura 19. Comparación de electrodos. (a) electrodo de hierro y (b) electrodo de aluminio (Kumar, et al., 2004). ..	38
Figura 20. Resultados experimentales de la remoción de arsénico a pH 6, 7 y 8 (Kumar, et al., 2004). ....	39
Figura 21. Diagrama de bloques del proceso. ....	41
Figura 22. Desbaste circular automático. ....	44
Figura 23. Celdas de electrocoagulación. ....	47
Figura 24. Estanque ecualizador. ....	47
Figura 25. Filtro multimedio. ....	48
Figura 26. Estanque de cloración. ....	49
Figura 27. Bomba centrífuga. ....	50
Figura 28. Perfil hidráulico del proceso. ....	50
Figura 29. Layout de la planta. ....	53
Figura 30. Costos operacionales. ....	62
Figura 31. Flujo de caja neto acumulado. ....	65
Figura 32. Análisis de sensibilidad según precio. ....	66
Figura 33. Análisis de sensibilidad según aumento de producción. ....	67
Figura 34. Estimación eficiencia bomba centrífuga. ....	74

## Índice de Tablas

Tabla 1. Comparación de tecnologías actuales para la remoción de As. ....	27
Tabla 2. Elementos o sustancias que no son esenciales en el agua potable. ....	29
Tabla 3. Parámetros establecidos ....	40
Tabla 4. Balance de masa. ....	43
Tabla 5. Potencia de cada bomba ....	51
Tabla 6. Detalle potencia consumida por equipo. ....	52
Tabla 7. Especificaciones materia prima. ....	56
Tabla 8. Depreciación lineal. ....	57
Tabla 9. Costos directos. ....	58
Tabla 10. Costos indirectos. ....	59
Tabla 11. Préstamo de inversión. ....	59
Tabla 12. Detalle remuneraciones. ....	60
Tabla 13. Detalle mantenimiento del proyecto. ....	61
Tabla 14. Flujo de caja. ....	63
Tabla 15. Flujo de caja (continuación). ....	63



## Introducción

El arsénico es un elemento químico ampliamente reconocido por sus graves efectos en la salud humana y el medio ambiente. Su exposición prolongada, especialmente a través del consumo de agua contaminada, puede ocasionar enfermedades graves, como cáncer, trastornos cardiovasculares, daños neurológicos y problemas en el desarrollo. Debido a su alta toxicidad, la Organización Mundial de la Salud (OMS) ha establecido un límite máximo de 10  $\mu\text{g/L}$  para el arsénico en agua potable, recomendación adoptada también por la normativa chilena NCh409/1. Sin embargo, muchas regiones enfrentan desafíos significativos para cumplir con este estándar, debido a la presencia de arsénico en aguas subterráneas y superficiales como resultado de procesos naturales y actividades antropogénicas. Este problema afecta especialmente a comunidades rurales que carecen de acceso directo a la red de agua potable, utilizando agua proveniente de pozos o ríos, sin ser previamente tratada.

El arsénico en el agua se encuentra principalmente en dos formas: arsenito  $\text{As(III)}$  y arseniato  $\text{As(V)}$ , siendo el arsenito más tóxico y difícil de eliminar. La persistencia de este contaminante representa un riesgo no solo para las personas, sino también para los ecosistemas acuáticos, donde se acumula y genera efectos adversos en la biodiversidad. En este escenario, el desarrollo de tecnologías que permitan la remoción eficiente de arsénico es una prioridad tanto para proteger la salud pública como para garantizar la sostenibilidad ambiental.

El proceso de electrocoagulación ha surgido como una alternativa prometedora frente a tecnologías convencionales para el tratamiento de agua. Este método se basa en reacciones electroquímicas que generan coagulantes in situ mediante la disolución controlada de electrodos metálicos, como el hierro o el aluminio. Estos coagulantes desestabilizan y eliminan los contaminantes del agua a través de procesos de coagulación y floculación. Entre sus principales ventajas se encuentran la menor necesidad de insumos químicos externos, la flexibilidad para operar en diferentes calidades de agua, y la reducción en la generación de residuos secundarios, como lodos químicos.

A pesar de sus beneficios, la implementación de la electrocoagulación requiere un análisis integral que contemple tanto sus aspectos técnicos como económicos. Es necesario evaluar parámetros clave, como la densidad de corriente, el tipo de electrodo, el pH y la distancia entre electrodos, para optimizar su operación y garantizar su eficiencia. Asimismo, es fundamental analizar la viabilidad económica del sistema, considerando costos de instalación, operación y mantenimiento, así como su sostenibilidad a largo plazo. Este enfoque permite identificar si la tecnología puede



ser adaptada a diferentes contextos, especialmente en comunidades donde los métodos tradicionales de tratamiento no son viables debido a limitaciones de infraestructura o recursos.

En este marco, esta memoria técnico-económica tiene como propósito proporcionar una visión integral del proceso de electrocoagulación para la remoción de arsénico desde aguas naturales. Se describen tanto los fundamentos científicos detrás del proceso como su aplicación práctica, incluyendo el análisis de estudios de caso y experiencias en el tratamiento de agua a diferentes escalas. Además, se busca establecer una base para futuras aplicaciones industriales de esta tecnología, con énfasis en su eficiencia, costos operativos, requerimientos de mantenimiento y sostenibilidad. Este trabajo también pretende sentar las bases para fomentar la implementación de soluciones innovadoras y sostenibles que contribuyan a garantizar el acceso al agua potable a comunidades que carecen de esta.

## **Objetivo general**

- Desarrollar el estudio técnico y económico para una planta de remoción de arsénico desde aguas naturales que emplee el proceso de electrocoagulación.

## **Objetivos específicos**

- Analizar los fundamentos teóricos para el desarrollo del estudio, fundamentar el alcance y establecer los parámetros operacionales.
- Desarrollar el estudio técnico del proceso planteado.
- Desarrollar el estudio económico del proceso planteado incorporando análisis de sensibilidad.



# 1 Antecedentes

## 1.1 Arsénico en la actualidad

Los metales pesados son elementos con una elevada densidad (mayor a  $5 \text{ g/cm}^3$ ) y masa atómica entre 63,55u a 200,59 u). Ellos se caracterizan por sus bajos umbrales de toxicidad, lo que puede generar efectos perjudiciales para la salud humana como para el medio ambiente. Debido a su naturaleza no biodegradable, los metales pesados tienen la capacidad de acumularse en los organismos, lo que puede resultar letal cuando superan los límites tolerables. Estos metales pueden encontrarse tanto de manera natural como resultado de actividades humanas (Melendes, 2022).

La contaminación del agua por metales pesados es un problema global significativo debido a la amenaza que éstos representan para la salud de los ecosistemas y de las personas. Entre los metales pesados comúnmente encontrados en el agua se encuentran el plomo (Pb), asociado con daños neurológicos; el mercurio (Hg), que se acumula en los tejidos de los peces y provoca daños neurológicos en quienes lo consumen; el cadmio (Cd), que puede causar daños en los riñones, los huesos y los pulmones; el cromo (Cr), que puede ser carcinogénico y provocar daños en el hígado y los riñones; y el arsénico (As), considerado como un metaloide que puede ocasionar diversos problemas de salud (Pabón, et al., 2021).

El presente estudio se centra en la remoción de arsénico desde aguas naturales, el cual es considerado por la OMS una de las diez sustancias químicas más preocupantes para la salud pública.

El arsénico un elemento natural de la corteza terrestre que se encuentra ampliamente distribuido en todo el medio ambiente, se encuentra presente en el aire, agua y tierra, de forma orgánica e inorgánica. Este elemento puede existir en distintas formas según su estado de oxidación, siendo sus formas más comunes el arsénico trivalente As(III) conocido como arsenito, y el arsénico pentavalente As(V) conocido como arseniato. El arsénico trivalente es el más tóxico para los seres humanos. El arsénico orgánico suele encontrarse en alimentos marinos en la forma de compuestos tales como arsenobetaína y arsenocolina. El arsénico inorgánico es mucho más tóxico que el arsénico orgánico, en su forma inorgánica se encuentra naturalmente en el suelo, en rocas y aguas. La liberación de arsénico puede ocurrir por procesos geológicos, como la erosión de minerales o por actividades humanas, como la minería, la quema de carbón, y el uso de algunos pesticidas (Organización Mundial de la Salud, 2024).



En cuanto a la exposición humana al arsénico, las personas suelen estar expuestas a niveles elevados a través del consumo de agua contaminada, ya que este elemento se encuentra en aguas subterráneas en concentraciones naturalmente altas. El arsénico desde las aguas puede ingresar al cuerpo humano cuando se bebe directamente el agua o bien cuando ésta es empleada para reglar alimentos. Los alimentos que más están relacionados con la ingesta de arsénico incluyen mariscos, arroz, rábanos, carnes, productos lácteos y cereales. Sin embargo, la exposición a través de los alimentos tiende a ser menor que la asociada al consumo directo de agua contaminada, dado que la concentración de arsénico en los alimentos depende del contenido del mineral en el propio alimento, y esta absorción tiene una temporalidad. Además, ciertos procesos industriales que involucran el uso de arsénico pueden constituir otra vía de exposición. Esto puede ocurrir a través de la inhalación de vapores o la absorción cutánea al entrar en contacto con productos que lo contienen. En conjunto, estas diferentes vías de exposición pueden contribuir a la acumulación de arsénico en el cuerpo humano y representar un riesgo para la salud a largo plazo (Organización Mundial de la Salud, 2024).

## **1.2 Efecto del arsénico en la salud**

Los efectos tóxicos del arsénico en los seres humanos pueden variar debido a una serie de factores, como la genética, el metabolismo individual, la dieta y el estado de salud de la persona afectada, entre otros. Aquellos con mayor riesgo de intoxicación suelen ser aquellos con una capacidad reducida para metabolizar el arsénico, lo que resulta en una acumulación del compuesto en el cuerpo. Entre los más vulnerables se encuentran los niños, cuyos organismos están en desarrollo, y las personas desnutridas, que pueden carecer de vitaminas A y C (Cabrera, et al., 2013)

La intoxicación por arsénico depende tanto del tiempo de exposición como de la concentración ingerida, y puede tener efectos agudos y a largo plazo. Los síntomas de intoxicación aguda incluyen vómitos, dolor abdominal, diarrea y calambres musculares, entre otros. En el caso de la intoxicación crónica, que resulta de una exposición prolongada al arsénico a través del agua o los alimentos, los síntomas pueden manifestarse después de unos cinco años e incluir cambios en la pigmentación de la piel, lesiones cutáneas, durezas y callos en las palmas de las manos y las plantas de los pies, lo que se asocia con la enfermedad conocida como Hidroarsenicismo Crónico Regional Endémico (HACRE) (MD, 2013).



El arsénico está clasificado como un compuesto cancerígeno por el Centro Internacional de Investigaciones sobre el Cáncer (CIIC) y se encuentra asociado con la aparición de cáncer de piel, vejiga y pulmón. Otros efectos importantes incluyen problemas en el desarrollo, diabetes, enfermedades pulmonares y cardiovasculares, abortos espontáneos, malformaciones congénitas y líneas de Mee.

Es precisamente debido a los efectos adversos, anteriormente expuestos, que la Organización Mundial de la Salud (OMS) establece directrices para la calidad del agua destinada al consumo humano, con el objetivo de proporcionar una base global para la regulación y normalización del suministro de agua. La OMS recomienda un límite de 10 microgramos por litro ( $\mu\text{g/L}$ ) para el arsénico en el agua potable, aunque se enfatiza la importancia de mantener las concentraciones lo más bajas posible, por debajo de este valor de referencia, siempre que sea técnicamente factible (Organización Mundial de la Salud, 2024). Asimismo, la normativa chilena NCh409 también establece un límite de 10  $\mu\text{g/L}$  para el arsénico en agua potable, alineándose con las recomendaciones internacionales (Instituto Nacional de Normalización, 2005). Estas medidas buscan minimizar el riesgo de exposición al arsénico y prevenir los efectos adversos para la salud asociados con su consumo a largo plazo.

### 1.3 Contaminación de aguas con arsénico

El arsénico presente en las aguas proviene de diversas fuentes, como la disolución natural de minerales y las actividades antropogénicas, incluyendo la descarga de efluentes industriales. El arsénico trivalente es el más difícil de eliminar de los cuerpos de agua. Puede encontrarse en forma de  $\text{H}_2\text{AsO}_3$  y en sus formas disociadas  $\text{H}_4\text{AsO}_3^+$ ,  $\text{H}_2\text{AsO}_3^-$  y  $\text{HAsO}_3^{2-}$  y  $\text{AsO}_3^{3-}$ . En cuanto al As(III), se presenta como  $\text{H}_3\text{AsO}_4$  y en sus formas disociadas como  $\text{H}_2\text{AsO}_4^-$ ,  $\text{HAsO}_4^{2-}$  y  $\text{AsO}_4^{3-}$  (Smedley, 2002).

El estado de oxidación del arsénico depende de las condiciones redox y del pH, en donde el As(V) predomina sobre el As(III) en condiciones oxidantes y a pH bajos y en el caso contrario predominan las especies de As(III), como se observa en la Figura 1.

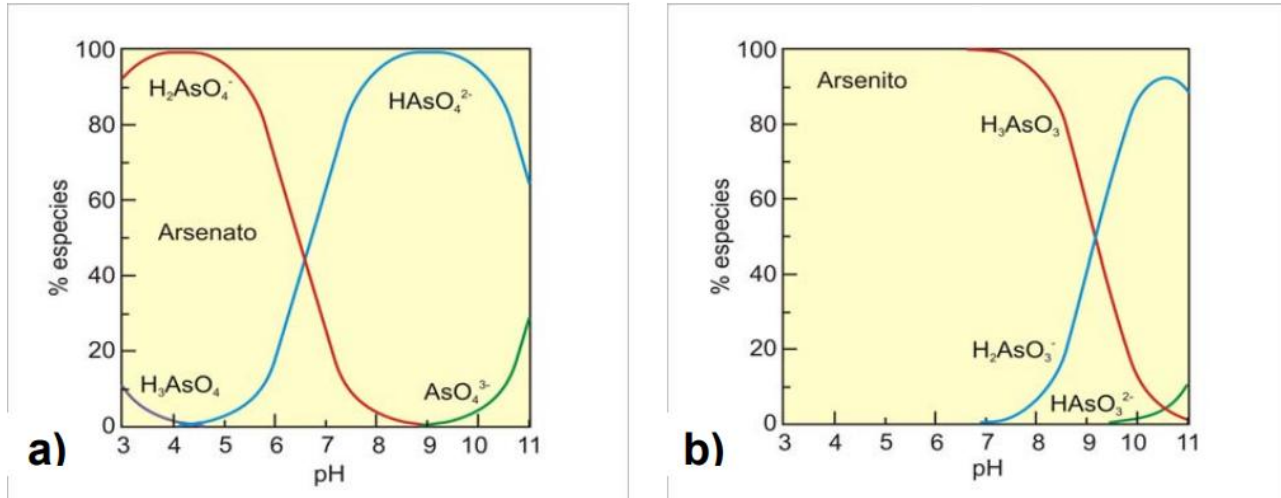


Figura 1. Especies de arsénico según pH (Lillo, 2008).

La forma de arsénico As(V) predomina sobre la trivalente en aguas superficiales, debido a su mayor nivel de oxigenación en comparación con las aguas subterráneas, donde pueden encontrarse ambos estados de oxidación. Los microorganismos, plantas y animales pueden transformar el arsénico inorgánico en compuestos orgánicos. Aunque estas formas orgánicas suelen encontrarse en concentraciones menores debido a la actividad microbiana, los compuestos predominantes son el ácido dimetilarsínico y el ácido monometilarsónico, los cuales contienen arsénico en estado pentavalente (Lillo, 2008).

En la Figura 2, se presentan los países latinoamericanos con mayor contaminación de arsénico presente en aguas subterráneas, superficiales y potable, en donde, Chile, Perú, Argentina y México son los que presentan mayores concentraciones de arsénico en América Latina (Rodríguez, et al., 2024).

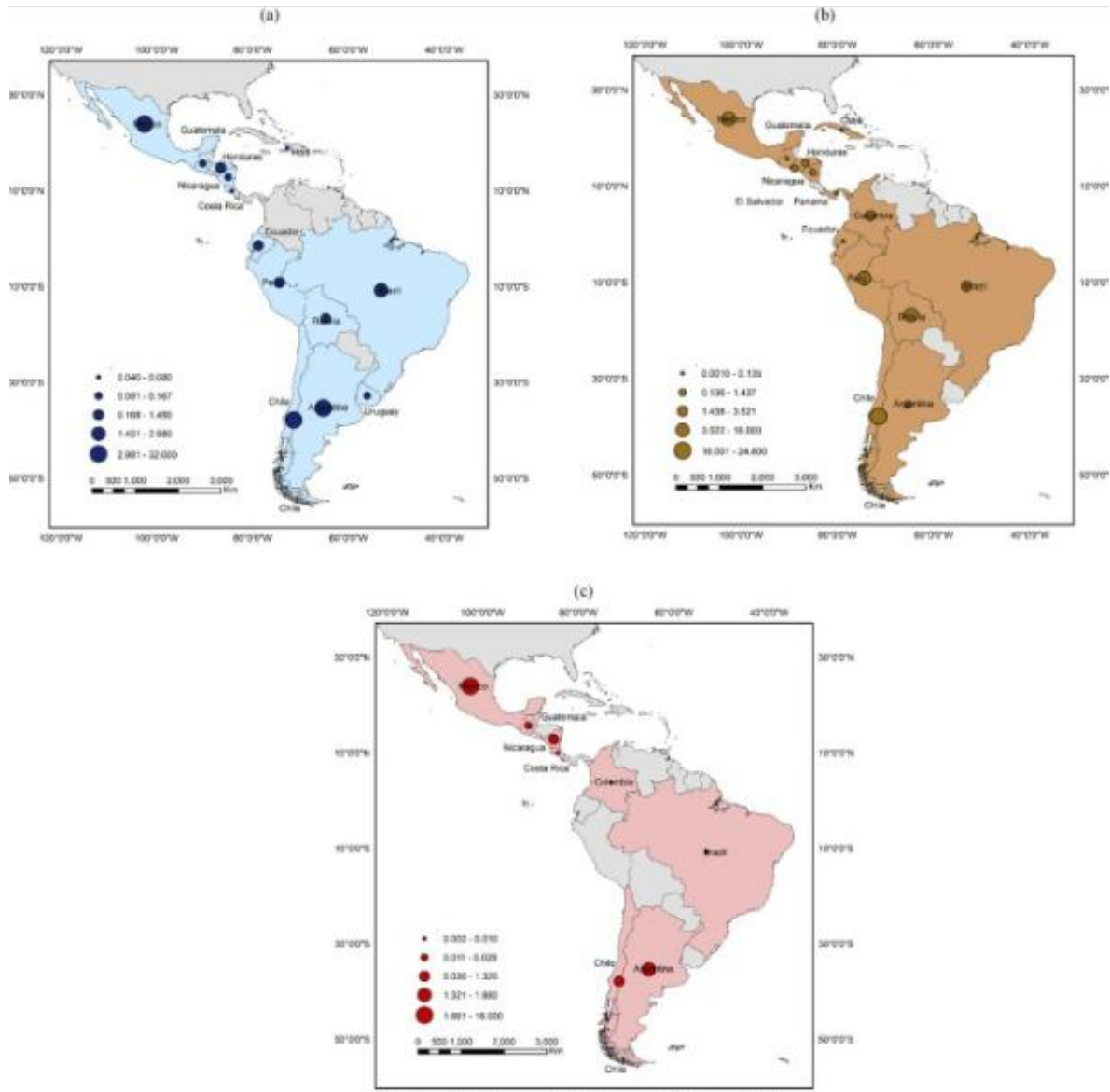


Figura 2. Presencia de arsénico en los recursos hídricos de los países latinoamericanos: (a) aguas subterráneas, (b) aguas superficiales y (c) agua potable (Rodríguez, et al., 2024).

### 1.3.1 Contaminación en aguas superficiales

Las concentraciones de arsénico en aguas de ríos varían aproximadamente entre 0,1 y 0,8  $\mu\text{g/L}$ , pudiendo alcanzar los 2  $\mu\text{g/L}$ , dependiendo de diversos factores como la composición de la recarga superficial, el drenaje de zonas mineralizadas, el clima, la actividad minera, la litología de la cuenca y los vertidos urbanos e industriales. En áreas con aportes de fuentes geotérmicas o aguas subterráneas, el contenido de arsénico puede ser alto. En regiones con clima árido, el aumento de la concentración de arsénico se asocia a un pH elevado y alta alcalinidad, resultado del proceso de



evaporación. En estas zonas, las concentraciones oscilan entre 190 y 21.900  $\mu\text{g/L}$ . Además, la contaminación por efluentes industriales o aguas residuales puede incrementar las concentraciones de arsénico en los ríos hasta 1.100  $\mu\text{g/L}$ , variando según el tipo de vertido y la distancia del foco emisor. Los desechos mineros y relaves también influyen significativamente en la concentración de arsénico, presentando variaciones de alrededor de 200 a 300  $\mu\text{g/L}$ . Estas variaciones dependen de la ubicación de la fuente de contaminación, dada la alta afinidad de adsorción de los minerales por el arsénico en condiciones oxidantes, neutras a ligeramente ácidas.

Las concentraciones de arsénico en las aguas de los lagos son similares o inferiores a las de los ríos. Estas aguas están afectadas por las mismas situaciones, con valores que pueden alcanzar hasta 1.000  $\mu\text{g/L}$  debido a la influencia del agua geotérmica, y un rango de 100 a 500  $\mu\text{g/L}$  debido a la actividad minera (Smedley, 2002). Sin embargo, el comportamiento de los lagos es diferente debido a una mayor presencia de evaporación, especialmente en lagos situados en climas áridos. Además, la estratificación causada por variaciones de temperatura genera un ambiente oxigenado en la capa superior y condiciones anóxicas (ausencia de oxígeno) en las capas inferiores. Esto provoca la estratificación de distintas especies de arsénico, con una tendencia a encontrar  $\text{As(V)}$  en la capa superior y  $\text{As(III)}$  en la capa inferior debido a las condiciones existentes.

En el agua de mar abierta, la concentración promedio de arsénico es de 1,5  $\mu\text{g/L}$ . En contraste, las aguas de los estuarios son más variables debido a la influencia de aguas provenientes de ríos y quebradas, que aportan diferentes niveles de salinidad y gradientes redox, alcanzando aproximadamente 4  $\mu\text{g/L}$  en condiciones naturales (Melendes, 2022).

Los estuarios, al ser ambientes mixtos, presentan procesos fisicoquímicos más complejos, como la variación en densidad, temperatura, pH y salinidad, además de procesos que controlan la entrada de arsénico desde la tierra al mar. Uno de estos procesos es la floculación de coloides formados por óxidos de hierro en la interfase de agua dulce y salada, lo cual contribuye a reducir el flujo de arsénico hacia el mar (Lillo, 2008).

### **1.3.2 Contaminación en aguas subterráneas**

El arsénico se encuentra en mayor concentración en las aguas subterráneas debido a su frecuente contacto con el agua en el subsuelo, lo que facilita su disolución y aumenta su presencia en estas aguas. Los acuíferos tienen un gradiente hidráulico pequeño, haciendo que el agua fluya

lentamente, aumentando el tiempo de residencia produciendo que el arsénico disuelto se acumule y aumente la concentración.

El arsénico se puede encontrar en las aguas subterráneas en un rango bastante amplio de concentraciones, entre  $<0,5$  a  $5.000 \mu\text{g/L}$ . Las altas concentraciones se pueden encontrar en diversos ambientes, en condiciones oxidantes con un pH alto el arsénico se desorbe de los hidróxidos de hierro y aluminio estando presente en su estado oxidado de  $\text{As(V)}$ , en condiciones anaeróbicas, el arsénico se libera por la disolución reductora microbiana y por la química de minerales de hierro (III) estando presente en su forma reducida  $\text{As(III)}$  y acuíferos afectados por actividad geotérmica, minera e industrial.

Actualmente, según la OMS, el arsénico se encuentra en niveles altos en diversos países de todo el mundo, como Argentina, Bangladesh, Camboya, Chile, China, Estados Unidos, India, México, Pakistán y Vietnam. En la Figura 3, se observa la distribución de arsénico en el mundo asociado con fuentes naturales, fuentes relacionadas con la minería y fuentes geotermales.



Figura 3. Distribución de arsénico en el mundo (Smedley, 2002).

En el estudio de Podgorski & Berg 2020, se desarrolla un modelo de riesgo mundial del arsénico, obteniendo como resultado que entre 94 y 220 millones de personas están potencialmente afectadas por la contaminación por este elemento en el agua, en la Figura 4 que la mayoría se encuentra en Asia.

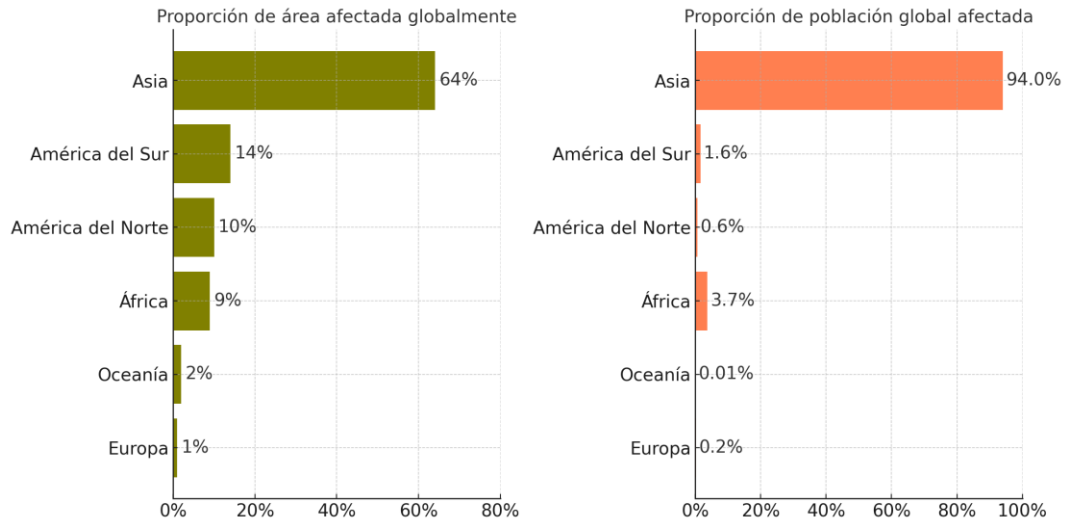


Figura 4. Población afectada por concentraciones de arsénico en aguas subterráneas (Podgorski & Berg, 2020).

En la Figura 5, se observa la probabilidad modelada de que la concentración de arsénico en el agua subterránea exceda los 10  $\mu\text{g/L}$ , tomando en cuenta muestras de aguas que no se sabe que están contaminadas por arsénico.

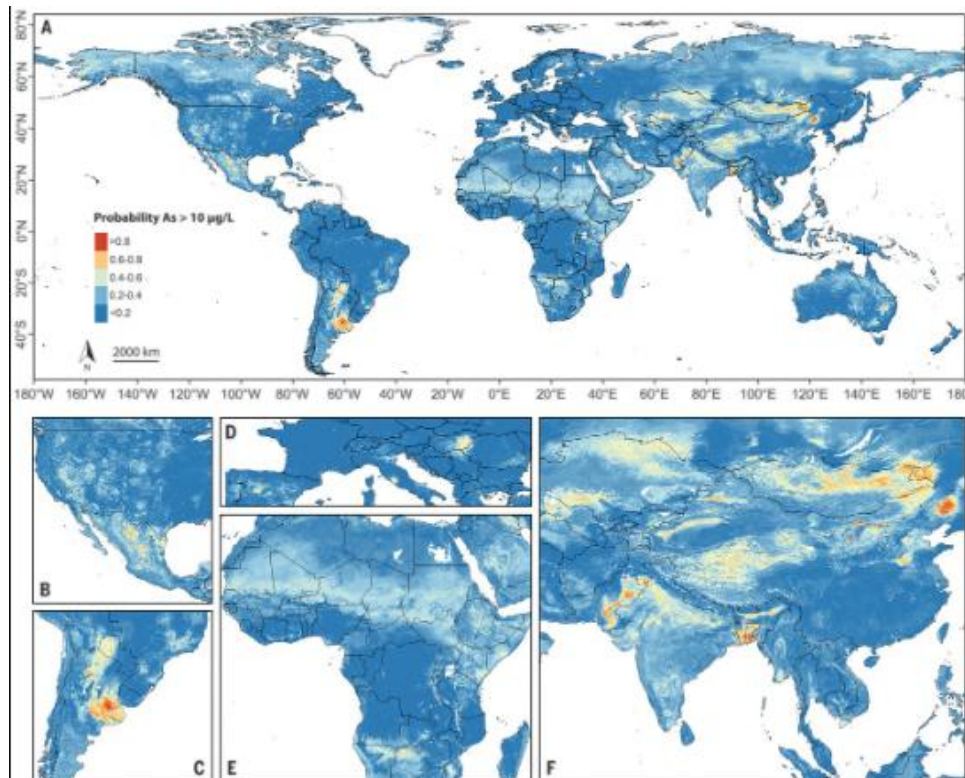


Figura 5. Predicción global del arsénico en aguas subterráneas (Podgorski & Berg, 2020).

Adicionalmente, la Figura 6 presenta la probabilidad global de contaminación por arsénico en aguas subterráneas en condiciones reductoras y de oxidación superior a  $10 \mu\text{g/L}$ , a través de un modelado realizado con el objetivo de proporcionar una visión global de las aguas afectadas por arsénico. En donde, las regiones más contaminadas son el sudeste asiático, Brasil, Bolivia, Ecuador, Costa Rica, Guatemala, Nicaragua, México, Chile, Argentina, el sureste de Estados Unidos y en el norte de Europa, lo cual concuerda con los estudios presentados anteriormente (Amini, et al., 2008).

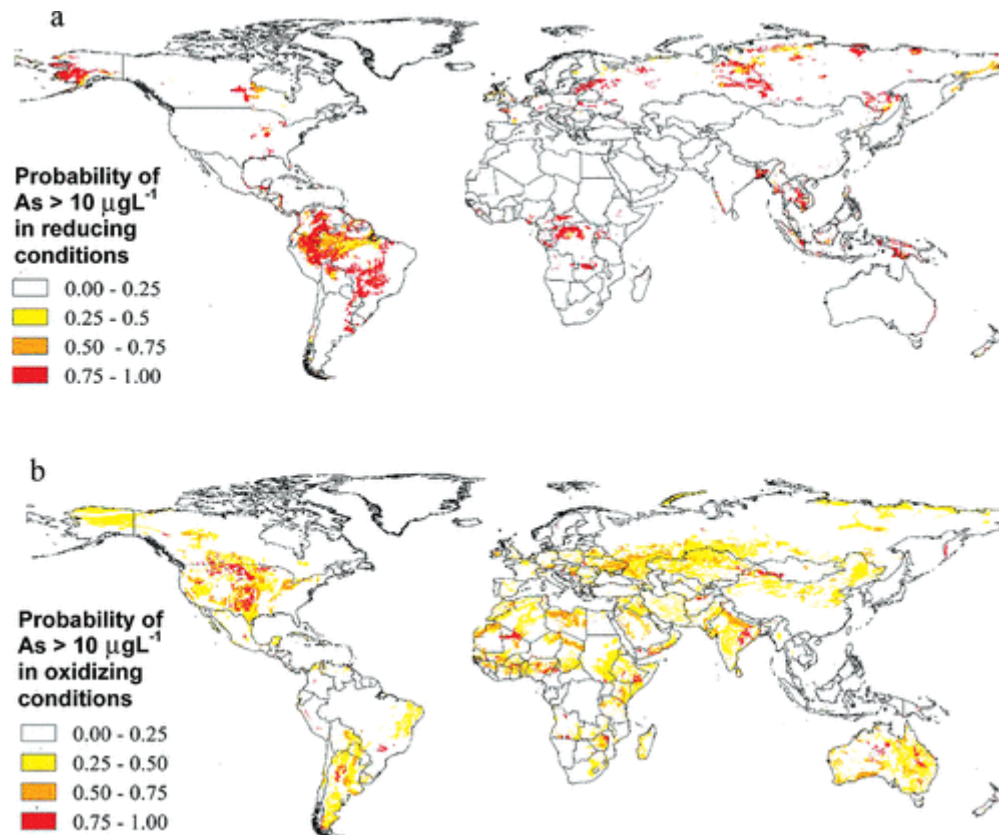


Figura 6. Probabilidad global modelada de contaminación geogénica por arsénico en aguas subterráneas (Amini, et al., 2008).

### 1.3.3 Contaminación de arsénico en Chile

En Chile la contaminación por arsénico en las aguas se presenta principalmente en la zona norte del país, en donde existe evidencia de efectos del arsénico en la salud de las personas de hace 7.000 años (Rodríguez, et al., 2024). Aquí la presencia de As en el agua está asociada mayormente a procesos geológicos y al volcanismo e hidrotermalismo en la zona cordillerana, donde además afectan la temperatura y salinidad. En las regiones de Arica y Parinacota, Tarapacá, Antofagasta y parte de Atacama es en donde se tiene concentraciones más altas de arsénico en aguas subterráneas

variando entre 1.000-10.000  $\mu\text{g/L}$ , mientras que las aguas provenientes de aguas termales superiores a 100  $\mu\text{g/L}$  se encuentran en el sector oriental de la zona, como se observa en la

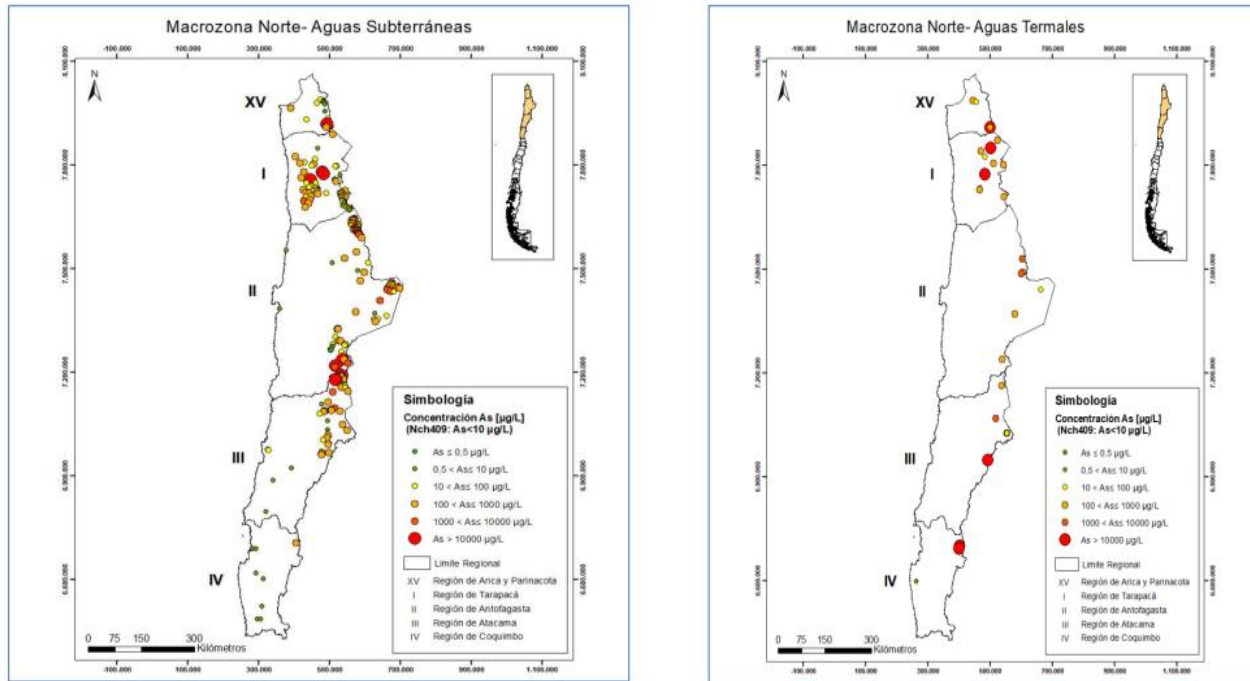


Figura 7. En esta zona también se encuentran los géiseres del Tatio, en donde se tienen concentraciones de arsénico mayor a 30.000  $\mu\text{g/L}$  que luego se incorporan al agua en el proceso de interacción agua-roca (Mella, 2021).

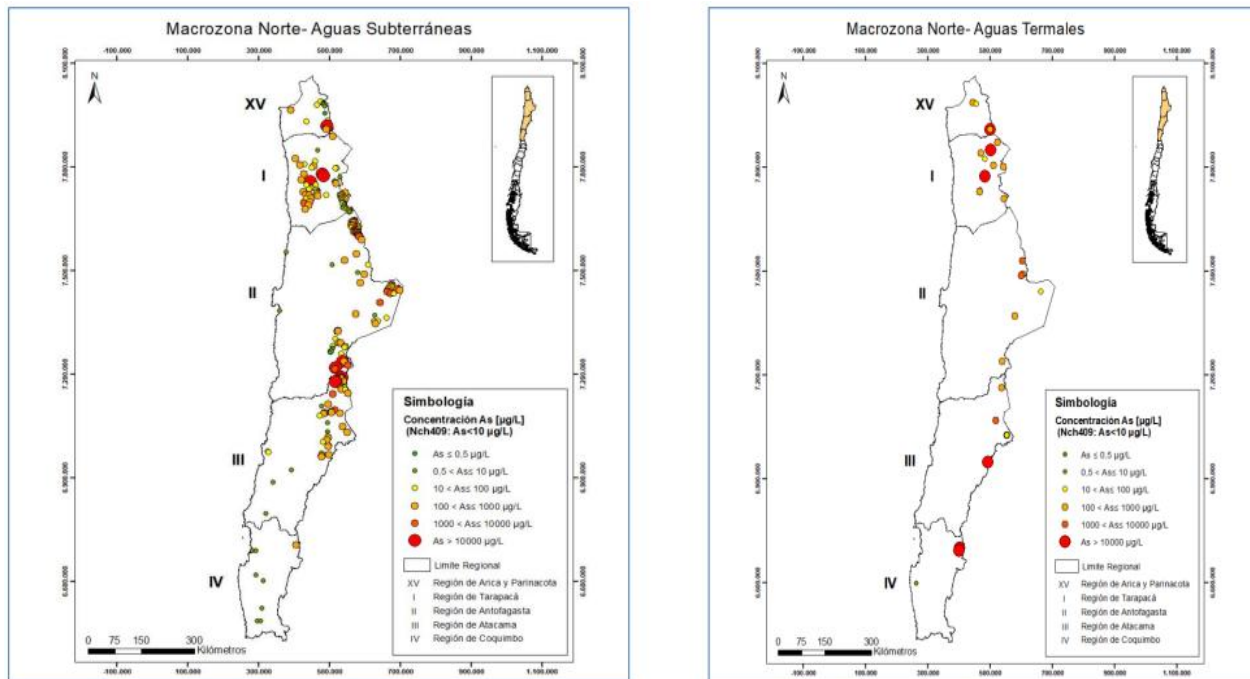


Figura 7. Distribución de As Norte de Chile (Mella, 2021).

En la zona centro del país, las aguas subterráneas presentan concentraciones de arsénico entre los 10-100  $\mu\text{g/L}$ , presentando valores menores que en la zona norte del país debido a que hay menor presencia volcánica y, además, hay mayor presencia de precipitaciones por lo que conlleva el proceso de dilución. En la región Metropolitana y Valparaíso es en donde se encuentran los mayores valores de arsénico en la zona desde fuentes termales, en un rango de 1.000-10.000  $\mu\text{g/L}$ , como se observa en la Figura 8.

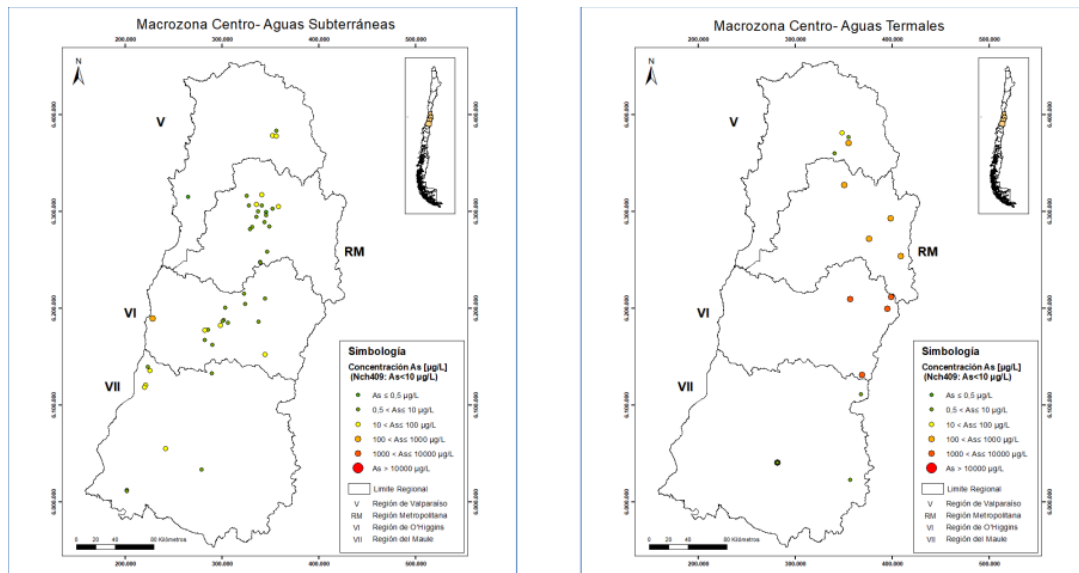


Figura 8. Distribución de As zona Centro de Chile (Mella, 2021).

En la zona sur, se presentan menores concentraciones de arsénico que en la zona norte, los valores de arsénico varían entre 1-400  $\mu\text{g/L}$ , en donde las aguas subterráneas son menores a 100  $\mu\text{g/L}$  y las aguas termales exceden los 100  $\mu\text{g/L}$ , como se observa en la Figura 9.

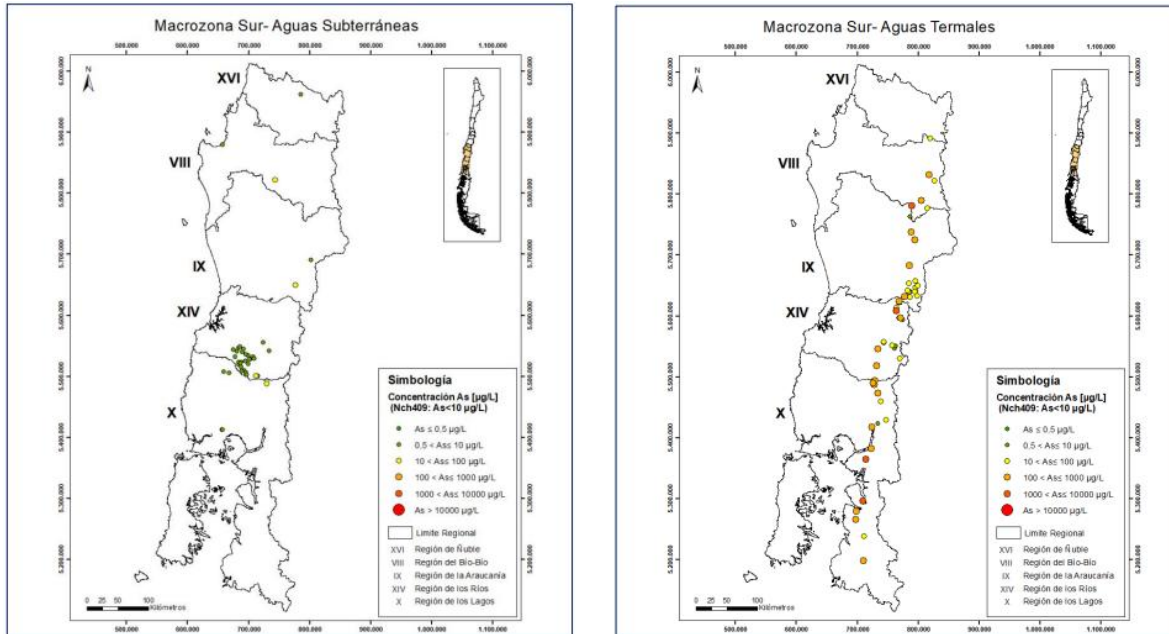


Figura 9. Distribución de As en zona Sur de Chile (Mella, 2021).

Por lo anterior, si bien la contaminación por arsénico en aguas es un problema presente en todo el país, las concentraciones de este elemento son mayores en la zona norte las cuales tienden a decrecer hacia el sur debido a procesos de dilución producto del aumento de precipitaciones o por la ausencia de evaporitas ricas en arsénico, salmueras y aguas salinas.

#### 1.4 Tecnologías de remoción de arsénico

En la actualidad existen varias tecnologías que se pueden aplicar para la remoción de arsénico en aguas. Cada una tiene un campo de aplicación óptimo, dependiendo de factores como la concentración de arsénico, la presencia de otros contaminantes y el volumen de agua a tratar. Las tecnologías presentan mejor eficiencia cuando el arsénico se encuentra en su forma pentavalente As(V), es decir, en su estado de oxidación, por lo que, es necesario tener una etapa de oxidación del As(III) al As(V), por adición de aire, oxígeno, ozono, fierro, etc, para su remoción óptima. Las tecnologías convencionales son la adsorción, coagulación-floculación e intercambio iónico, mientras que las tecnologías más avanzadas, se encuentra la electrocoagulación y los procesos de separación por membranas.

### 1.4.1 Adsorción

Este proceso implica la transferencia de materia entre las fases líquida y sólida o gaseosa y sólida, donde iones, átomos o sustancias disueltas son atrapadas en la superficie del sólido, como se muestra en la Figura 10. La molécula que se transfiere y se adsorbe se denomina adsorbato, mientras que el sólido que realiza la adsorción se llama adsorbente. Los adsorbentes se caracterizan por su alta porosidad y son más eficientes cuanto mayor es su área superficial, ya que pueden acumular más material. Entre los principales adsorbentes se encuentran el carbón activado, la alúmina activada, sílica gel y las zeolitas, siendo los dos primeros los más utilizados en la eliminación de metales pesados del agua.

La eficiencia de la remoción de arsénico mediante adsorción depende de varios factores clave, siendo el estado de oxidación del arsénico el más importante. Este proceso únicamente remueve As(V), por lo que es imprescindible oxidar previamente el As(III) a As(V) para garantizar la efectividad del tratamiento. El pH también influye significativamente, con mejores resultados en rangos ácidos (6-8), lo que puede requerir ajustes adicionales en el agua a tratar. La presencia de otros iones competidores, como fosfatos, sulfatos o silicatos, reduce la eficiencia al competir por los sitios activos del adsorbente. Además, el tiempo de contacto debe ser suficiente para maximizar la interacción entre el arsénico y el adsorbente, cuya capacidad es limitada y requiere regeneración o reemplazo al saturarse. Otros factores como la calidad del agua, que puede contener materia orgánica o turbidez, y el diseño del sistema operativo afectan también el rendimiento del proceso (Figueroa, 2013).

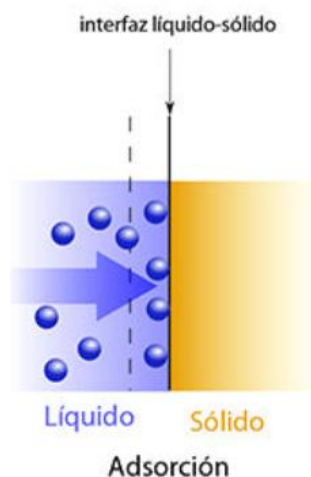


Figura 10. Proceso de adsorción.



### 1.4.2 Coagulación-floculación

Es uno de los métodos comúnmente empleados para eliminar el arsénico del agua. Este proceso implica la introducción de un coagulante para modificar las características de las partículas, en este caso, neutralizar las cargas eléctricas de las partículas coloidales, provocando su agrupación en pequeños aglomerados que exhiben una densidad mayor que la del agua (coágulos). Posteriormente, se lleva a cabo el proceso de floculación, en el cual las partículas desestabilizadas coalicionan entre sí, incrementando su tamaño, formando flóculos, para finalmente sedimentarse y ser filtradas, tal como se muestra en la Figura 11 (Calderón, et al., 2010).

La eficacia del procedimiento está condicionada por varios factores, como el tipo de coagulante, su dosificación y el pH. Los resultados óptimos para la eliminación de arsénico se logran empleando sulfato férrico como coagulante, con un pH de 7,6 y una dosis de 20 mg/L o superior. Esto puede conducir a una remoción de hasta un 90% de As(V). Sin embargo, la presencia de aniones competidores, como fosfatos, bicarbonatos y silicatos, puede reducir significativamente la eficiencia del proceso al interferir en la precipitación de compuestos de arsénico. Además, como el As(III) no se elimina de manera eficiente mediante coagulación, es imprescindible una etapa previa de oxidación para convertirlo en As(V), lo que aumenta los costos y la complejidad del tratamiento. Otro factor crítico es el pH, ya que la remoción óptima requiere que este se mantenga en un rango específico, y desviaciones fuera de este rango disminuyen considerablemente la eficiencia del proceso. La coagulación también genera grandes volúmenes de lodos que contienen arsénico y otros contaminantes, cuya disposición segura representa un desafío técnico y económico, especialmente en regiones con regulaciones estrictas. Además, la calidad variable del agua, incluyendo turbidez, materia orgánica o concentraciones de otros metales, puede interferir en la eficacia del tratamiento al consumir el coagulante o formar compuestos no deseados. Finalmente, la sensibilidad del proceso a la dosificación del coagulante y la necesidad de monitoreo constante incrementan los costos operativos, mientras que la eficiencia disminuye en casos de concentraciones muy altas de arsénico, lo que puede requerir tecnologías complementarias para garantizar un tratamiento adecuado (Aguilar, 2005).

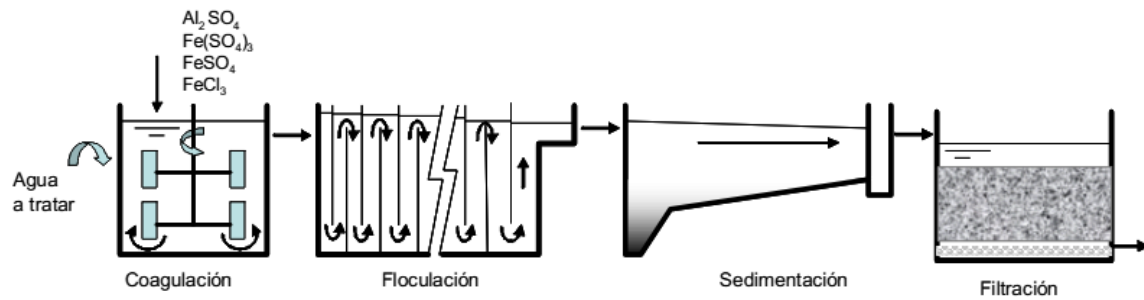


Figura 11. Proceso de coagulación-floculación. (Calderón, et al., 2010)

### 1.4.3 Intercambio iónico

El intercambio iónico es un proceso fisicoquímico en el que los iones disueltos de una solución son intercambiados por iones de carga similar presentes en una resina especializada, que ha sido cargada con los iones deseados, como se ilustra en la Figura 12. Este intercambio sólido-líquido se realiza sin modificar sustancialmente la estructura del sólido. Las resinas tienen una capacidad finita de intercambio y deben ser recargadas o regeneradas cuando se saturan (Fluence, 2024).

Para la remoción de arsénico, el intercambio iónico debe realizarse a un pH entre 8 y 9. Sin embargo, esta tecnología no es muy eficiente para eliminar arsénico, ya que la presencia de selenio, fluoruro, nitrato y sólidos disueltos compite con el arsénico, reduciendo la eficiencia del proceso debido a la baja selectividad de las resinas (Cabrera, et al., 2013).

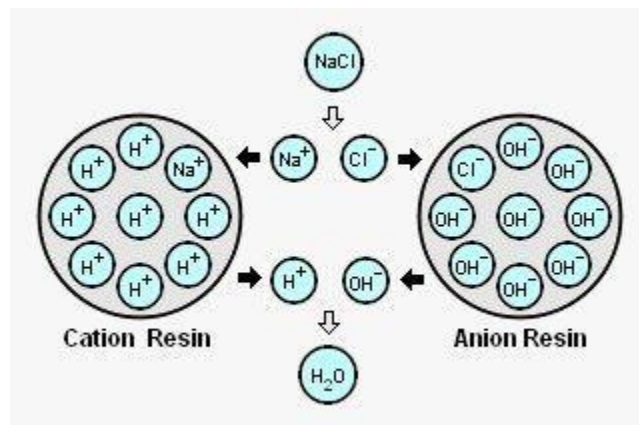


Figura 12. Proceso intercambio iónico.

### 1.4.4 Separación a través de membranas:

El proceso de separación por membranas su principio es que la membrana funciona como filtro en donde se hace pasar el agua a tratar reteniendo los sólidos suspendidos y otras sustancias. Estas membranas funcionan como barreras selectivas y semipermeables. En este proceso se necesita un

gradiente de presión para que las especies se muevan a través de las membranas, obteniendo un permeado (agua tratada) y un rechazo (sólidos disueltos). El proceso se observa en la Figura 13.

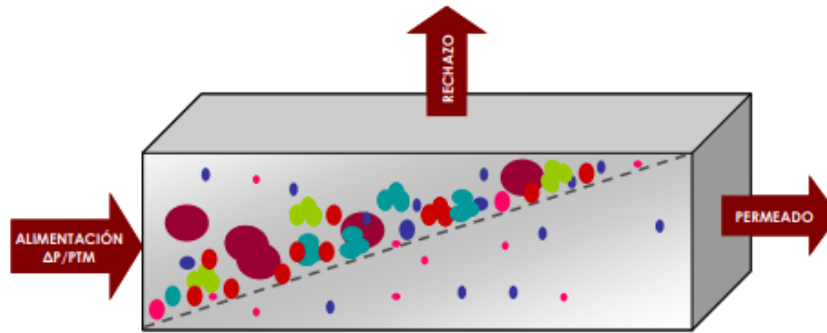


Figura 13. Proceso de separación a través de membranas (Calderón, et al., 2010).

Existen cuatro procesos basados en este principio: microfiltración (MF), ultrafiltración (UF), nanofiltración (NF) y ósmosis inversa (OI). Estos procesos se diferencian por el tamaño de los poros de sus membranas, ordenándose de mayor a menor tamaño. La MF posee los poros más grandes, mientras que la OI tiene los más pequeños.

Los poros de las membranas de microfiltración y ultrafiltración, al ser más grandes, operan a baja presión y funcionan como un tamiz, lo que impide la filtración de metales del agua. Estos procesos son capaces de filtrar partículas de hasta  $0,01 \mu\text{m}$ , como se muestra en la Figura 14, incluyendo materia orgánica natural, bacterias, algas, y virus, entre otros.

La nanofiltración ofrece una mayor selectividad que la ultrafiltración, lo que permite remover arsénico del agua de manera más efectiva. La eficiencia del proceso depende de varios factores, incluyendo los parámetros de operación, las propiedades de las membranas y el estado de oxidación del arsénico. En particular, la remoción del  $\text{As(V)}$  alcanza aproximadamente un 85% de eficiencia, mientras que la remoción del  $\text{As(III)}$  es considerablemente menor, con aproximadamente un 12%. Esta diferencia se debe principalmente a los cambios en la repulsión electrostática en la superficie de la membrana.

En el caso de la ósmosis inversa, se aplica una presión superior a la presión osmótica para hacer circular el agua a través de la membrana. Este método es altamente efectivo para remover arsénico de aguas subterráneas, logrando una eficiencia de remoción del 95% del arsénico disuelto. Sin embargo, la eficiencia puede verse afectada por la presencia de turbiedad, hierro, magnesio y sílice en el agua. Sin embargo, la eficiencia del proceso puede verse afectada por diversos factores. La presencia de turbidez, hierro, magnesio y sílice en el agua puede obstruir o ensuciar las membranas,

reduciendo su vida útil y su capacidad de filtración. Además, la ósmosis inversa requiere un pretratamiento riguroso para remover partículas y prevenir la formación de incrustaciones, lo que incrementa los costos operativos. Este método también presenta una alta sensibilidad al pH, ya que las membranas funcionan de manera óptima en rangos específicos, lo que puede requerir ajustes adicionales en el agua a tratar. Asimismo, el rechazo del arsénico en forma de As(III) es menos eficiente en comparación con el As(V), por lo que es necesario oxidar previamente el arsénico trivalente. Otro desafío importante es la generación de un flujo de rechazo altamente concentrado en arsénico y otros contaminantes, cuya disposición adecuada implica costos adicionales y desafíos ambientales. Finalmente, la ósmosis inversa es una tecnología intensiva en energía debido a las altas presiones necesarias para su funcionamiento, lo que limita su implementación en regiones con recursos económicos o energéticos limitados (Calderón, et al., 2010).

tamaño, $\mu\text{m}$	iónico		moléculas		macromoléculas		micro-partículas		macro-partículas	
	0,001	0,01	0,1	1	10	100	1000			
peso molecular aproximado (Da)	100	200	1.000	10.000	20.000	100.000	500.000			
tamaño de algunos materiales contenidos en el agua	sales acuosas		virus		materia orgánica natural		bacterias		algas	
	iones metálicos						quistes		arenas	
					arcillas		lodos			
					fibras de asbesto					
tipo de filtración	ósmosis inversa		nanofiltración		ultrafiltración		microfiltración		filtración convencional	

Figura 14. Límites de separación para diferentes membranas.

### 1.4.5 Electrocoagulación

En el año 2001, Balasubramanian y Madhavan desarrollaron estudios a escala de laboratorio para la remoción de arsénico de efluentes industriales, obteniendo una eficiencia de remoción de arsénico entre el 70% y el 90%. Este proceso, conocido como electrocoagulación, emplea corriente eléctrica para inducir reacciones de oxidación-reducción que facilitan la eliminación de contaminantes.

Durante la electrocoagulación, en el ánodo, el electrodo metálico se oxida y libera electrones, mientras que, en el cátodo, estos electrones son transferidos a los oxidantes presentes. Un conductor facilita la entrada y salida de electrones, permitiendo el movimiento de iones entre los electrodos. Este flujo de electrones es impulsado por una fuente externa de corriente, asegurando que por cada electrón que sale del generador, otro regrese, manteniendo así el equilibrio del sistema (Calderón, et al., 2010).

Este método utiliza la generación de coagulantes in situ mediante la disolución de electrodos metálicos, como el aluminio y el hierro. El proceso se lleva a cabo en varias etapas, que incluyen la oxidación del electrodo, la formación de hidróxidos metálicos, la desestabilización de los contaminantes, la floculación y la sedimentación, como se ilustra en la Figura 15.



Figura 15. Proceso de electrocoagulación (Calderón, et al., 2010).

### 1.4.6 Comparación de tecnologías

En la Tabla 1, se presenta una tabla comparativa que resume las principales tecnologías utilizadas para la remoción de arsénico en el tratamiento de agua. Se analizan aspectos clave como la eficiencia en la remoción de As, costos de inversión, y el espacio requerido para su implementación. Cabe destacar que la electrocoagulación se presenta como una tecnología innovadora, ya que no solo permite la remoción efectiva de As(V), sino que también puede oxidar el As(III) a As(V) dentro del mismo proceso, mejorando así la eficiencia global del tratamiento.



Esta característica la convierte en una opción atractiva para abordar la problemática del arsénico en el agua.

Tabla 1. Comparación de tecnologías actuales para la remoción de As.

Tecnología	Costos de inversión	Espacio requerido	Eficiencia de remoción de As
Adsorción	Media	Media	Media
Coagulación-floculación	Baja	Alta	Alta
Intercambio iónico	Media	Baja	Baja
Osmosis inversa	Alta	Alta	Alta
Electrocoagulación	Media	Media	Alta

### 1.5 Normativa en Chile

Actualmente, la normativa por la que se rige Chile es por, la norma NCh 409 "Agua Potable", la cual consta de dos partes: "Parte 1: Requisitos" publicada en 2005 y "Parte 2: Muestreo" publicada en 2004. Estas normas fueron diseñadas para regular la calidad del agua potable en la red de distribución que reciben los usuarios dentro del territorio operacional. Además, establecen los requisitos y las frecuencias de muestreo necesarios para asegurar dicha calidad.

Estas normas se basaron en las Guías para la Calidad de Agua Potable de la Organización Mundial de la Salud (OMS) de 1995 y su actualización de 2004. La implementación de estas normas asegura que el agua suministrada cumpla con los estándares internacionales de seguridad y calidad, protegiendo así la salud de los consumidores (Superintendencia de servicios sanitarios, 2022).

La Norma chilena NCh409 establece los requisitos de calidad que debe cumplir el agua potable, agrupados por distintos parámetros: Tipo I Parámetros microbiológicos y de turbiedad; Tipo II Elementos o sustancias químicas de importancia para la salud; Tipo III Elementos radioactivos; Tipo IV Parámetros relativos a las características organolépticas; Tipo V Parámetros de desinfección (Instituto Nacional de Normalización, 2005).

#### *Tipo I Criterios para parámetros microbiológicos y turbiedad*



Se utiliza como indicador de la calidad del agua los microorganismos del grupo coliforme, en donde se establece la cantidad de coliformes que pueden estar presentes en el muestreo del agua y además todas las muestras analizadas no deben contener *Escherichia coli*. Para la turbiedad, se establecen los límites en donde no se puede superar el valor de 4 UNT en una muestra mensual.

Tipo II Criterios para elementos o sustancias químicas de importancia para la salud de las personas. Se describen los límites máximos de las concentraciones de los tipos de elementos esenciales, los elementos o sustancias no esenciales, sustancias orgánicas, plaguicidas y productos secundarios de la desinfección que no debe contener el agua potable. En la Tabla 2 se muestran los elementos y sustancias que no son esenciales en el agua potable. En donde el límite para el arsénico es de 0,01 mg/L.

Tabla 2. Elementos o sustancias que no son esenciales en el agua potable.

Elemento o sustancia	Límite máximo mg/L
Arsénico (As)	0,01
Cadmio (Cd)	0,01
Cianuro (CN <sup>-</sup> )	0,05
Mercurio (Hg)	0,001
Nitrato (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	50
Nitrito (NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> )	3
Razón nitrato+nitrito	1
Plomo	0,05

#### ***Tipo IV Requisitos de calidad para parámetros organolépticos***

Se establecen parámetros físicos como el color, el olor y el sabor del agua, que deben garantizar que sea incolora, inodora e insípida. Además, se especifican límites para compuestos inorgánicos tales como el amoníaco, los cloruros, el pH, los sulfatos y las sales disueltas. Por último, la norma regula los parámetros orgánicos, incluyendo la presencia de compuestos fenólicos.

#### ***Tipo V Criterios para parámetros de desinfección***



El agua potable distribuida por redes debe ser sometida a un proceso de desinfección, en el cual es obligatorio mantener una concentración residual de desinfectante activo de manera permanente. Esta concentración no debe superar los 2 mg/L ni estar por debajo de los 0,2 mg/L. Esto asegura que el agua sea segura para el consumo y que no haya proliferación de microorganismos patógenos en la red de distribución.

## 2 Estudio Técnico

### 2.1 Definición de la producción

Para determinar el volumen de agua a tratar y por ende la cantidad de agua tratada a suministrar, se identificaron las áreas con mayores niveles de contaminación por arsénico en aguas subterráneas en Chile. Por esta razón, se ha decidido establecer la planta de tratamiento por electrocoagulación en la I Región de Tarapacá, que presenta aguas subterráneas con una concentración promedio de arsénico de 5.500  $\mu\text{g/L}$  (Mella, 2021).

Se llevó a cabo un análisis para seleccionar la comuna más adecuada, priorizando aquellas que carecen de acceso a agua potable. Según el censo del año 2017, las zonas rurales son las que presentan una mayor carencia de servicios básicos. Finalmente, se eligió la comuna de Colchane, la cual se ubica en la Provincia del Tamarugal, en la frontera con Bolivia. En la Figura 16, se muestra la ubicación de la comuna en el mapa.



Figura 16. Ubicación geográfica de comuna de Colchane, I Región Tarapacá.

### 2.1.1 Cantidad de agua a tratar

Para determinar la cantidad de agua a tratar, se tomaron los datos otorgados por el Gobierno Regional de Tarapacá, obteniendo información sobre el acceso a servicios básicos, como el agua potable de la red pública, suministro continuo de la electricidad y conexión a internet (Gobierno Regional Tarapacá, 2023). En la Figura 17, se observa el gráfico con los datos para cada comuna de la región.

Viviendas sin acceso a servicios básicos Región de Tarapacá

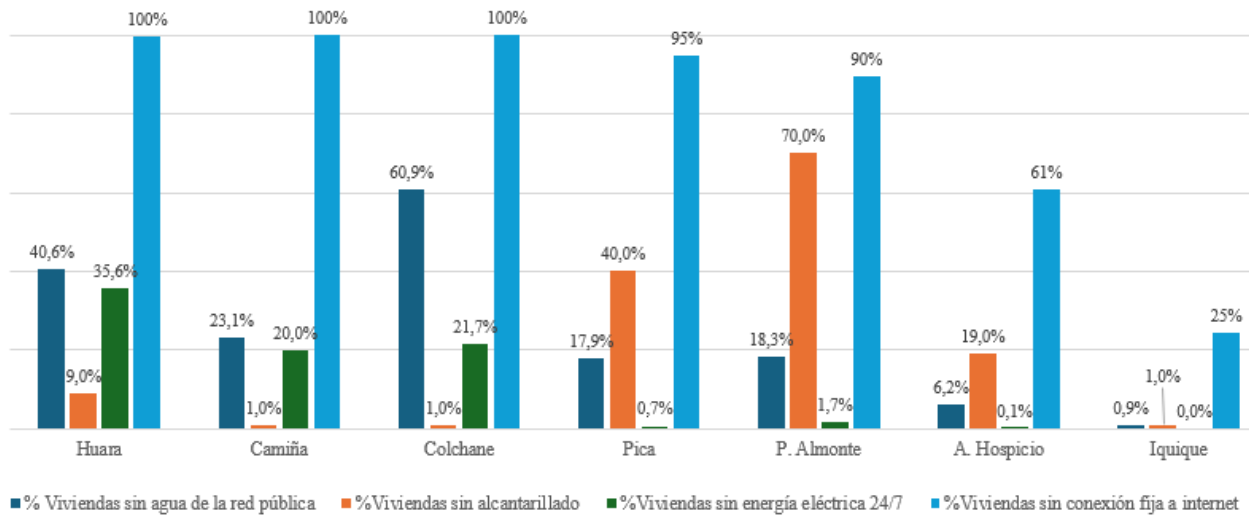


Figura 17. Gráfico % de viviendas sin acceso a servicios básicos en Región de Tarapacá (Gobierno Regional Tarapacá, 2023).

En comuna de Colchane, un 60,9% de las viviendas no tienen agua de la red pública, abasteciéndose a través de pozos, camiones aljibes, ríos, esteros o canales (Gobierno Regional Tarapacá, 2023). Su población de acuerdo con las proyecciones para el año 2024 otorgadas por el Instituto Nacional de Estadística (INE) es de 1.558 personas (Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, 2024).

Para poder estimar la producción de agua potable, se considera que una persona requiere 60 L/persona·día de agua como mínimo, dato otorgado por la Superintendencia de Servicios Sanitarios (Superintendencia de Servicios Sanitarios, 2023).

Con los datos anteriores se realiza el cálculo de la producción estimada de agua potable, el cual se muestra a continuación:

$$Producción\ de\ agua = 1.558 [personas] * 60,9\% * 60 \left[ \frac{L}{persona \cdot día} \right] = 56.929 \left[ \frac{L}{día} \right]$$

Por lo que, la producción estimada que se considera en este trabajo es de 57 m<sup>3</sup>/día.

### 2.1.2 Calidad de agua a tratar

En la Figura 18, se observa la distribución de arsénico en las aguas subterráneas en la zona Norte del país, en donde, para la Región de Tarapacá, se tiene mayoritariamente un rango de arsénico

entre los 100 y 1.000  $\mu\text{g/L}$  y en menor medida casos entre 1.000 y 10.000  $\mu\text{g/L}$ . Por lo que, se evaluará para el peor de los casos, que serían aguas contaminadas con 10.000  $\mu\text{g/L}$  de arsénico (Mella, 2021).

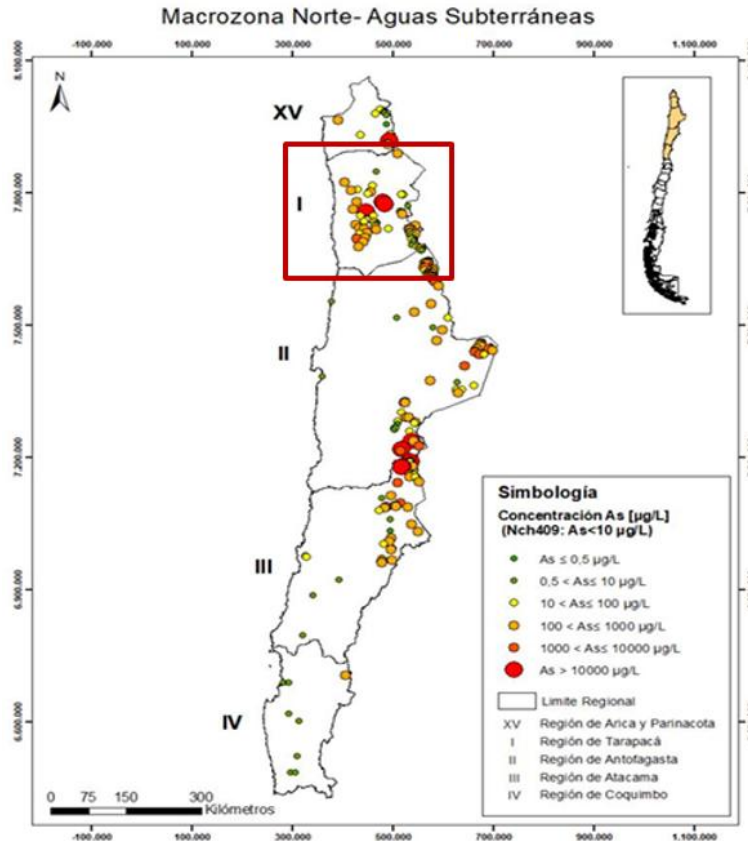


Figura 18. Distribución de arsénico en aguas subterráneas en zona Norte de Chile.

Es fundamental identificar la cantidad de As(III) y As(V) presente en el agua a tratar. Las aguas subterráneas, típicamente, presentan un pH entre 6.5 y 8.5 en condiciones anaeróbicas (Parga, et al., 2005) siendo, la proporción de arsenito sobre el arsénico total de un 60% (Lillo, 2008).

También es necesario considerar los sólidos suspendidos totales (SST) los cuales suelen ser mínimos en aguas subterráneas en comparación con aguas superficiales. Esto se debe a que el agua subterránea pasa a través de capas de suelo y roca que funcionan como un filtro natural, eliminando la mayoría de los sólidos suspendidos. En un estudio sobre la calidad del agua en pozos, se reporta un valor de SST menor a 5 mg/L, el cual se utilizará como base de diseño para el presente estudio (Superintendencia del Medio Ambiente, 2021).



## 2.2 Proceso de electrocoagulación

El proceso de electrocoagulación implica una reacción de óxido-reducción, en la cual se aplica una intensidad de corriente eléctrica a través de electrodos, un ánodo y un cátodo. Producto de las reacciones generadas, las especies cambian su estado de oxidación de manera que su generación, contribuye por medio de diversos mecanismos, a remover las partículas contaminantes presentes en el agua.

### 2.2.1 Teoría del proceso

Los fundamentos de la electrocoagulación residen en la Ley de Faraday, que establece una relación entre la cantidad de sustancia que se transforma en un electrodo durante la electrólisis y la cantidad de corriente eléctrica que pasa a través del sistema. Es decir, la masa de la sustancia producida en un electrodo durante el proceso es directamente proporcional a la cantidad de carga que pasa por el circuito. La ecuación es:

$$Q = I \cdot t = \frac{z \cdot F \cdot m}{M} \text{ (ec. 1)}$$

Donde:

- Q es la carga eléctrica total que pasó por la solución (C)
- I es la corriente aplicada (A)
- t es el tiempo en el cual se aplica la corriente (s)
- z es el número de electrones implicados en la oxidación (valencia del ion en solución)
- F es la constante de Faraday (96.485 C/mol)
- m es la masa del hierro disuelta (g)
- M es la masa molar de la sustancia (g/mol)

El proceso de electrocoagulación implica diferentes fenómenos físico- químicos, con base en una o más reacciones no espontáneas de óxido- reducción, cuya ocurrencia se debe a la transferencia de electrones gracias al paso de una corriente externa. La formación de los coagulantes es “in situ” e implica tres fases para su producción (Mollah, et al., 2004):

1. Formación de coagulantes: Al aplicar una corriente eléctrica, el electrodo de sacrificio (generalmente de hierro o aluminio) se oxida, liberando iones metálicos al agua. Estos iones metálicos reaccionan con el agua formando hidróxidos metálicos, que actúan como



coagulantes efectivos. Los hidróxidos desestabilizan partículas suspendidas y adsorben contaminantes disueltos, facilitando su remoción. Además, en el caso de los electrodos de hierro, se generan intermediarios reactivos, como radicales hidroxilo ( $\bullet\text{OH}$ ) y especies de hierro en estados de oxidación superiores (como  $\text{Fe(IV)}$ ). Estos intermediarios mejoran la eficiencia del proceso al oxidar contaminantes específicos, como el arsénico trivalente ( $\text{As(III)}$ ) a su forma pentavalente ( $\text{As(V)}$ ), que es adsorbida y removida por los hidróxidos metálicos.

2. Desestabilización de contaminantes: Se crea una compresión en la doble capa difusa que rodea a las partículas cargadas. Esto ocurre debido a los iones generados en el ánodo afectan la interacción entre las partículas. Los contraiones, liberados por la disolución del electrodo, neutralizan la carga de las partículas contaminantes, reduciendo la repulsión electrostática. Cuando esta repulsión disminuye, las fuerzas de atracción (como las de Van der Waals) comienzan a dominar, favoreciendo la coagulación.
3. Formación de flóculos: Una vez que las partículas se han coagulado, se agrupan en flóculos más grandes. Estos flóculos actúan como un "manto de lodo" que atrapa y une partículas coloidales aún presentes en el agua, facilitando su eliminación en etapas posteriores del tratamiento.

### 2.2.2 Electrocoagulación

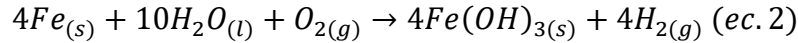
En el proceso de electrocoagulación, se aplica un potencial eléctrico entre dos o más electrodos, los cuales suelen ser hierro o aluminio. Este potencial provoca la disolución de Fe o Al en el ánodo, generando iones metálicos ( $\text{Fe}^{+3}$  o  $\text{Al}^{+3}$ ) que rápidamente se hidrolizan a hidróxidos ( $\text{Fe(OH)}_3$  o  $\text{Al(OH)}_3$ ). Estos cationes metálicos atraen partículas cargadas negativamente en el agua, facilitando su movimiento hacia el ánodo mediante electroforesis. Al combinarse con estas partículas, se produce la coagulación (Akhter, et al., 2021).

Los coágulos son eliminados del agua a través de técnicas como electroflotación, donde se generan burbujas que elevan los coágulos a la superficie, o mediante sedimentación y filtración, dependiendo de las características del proceso y los contaminantes presentes. Durante este proceso, el agua también se electroliza, produciendo burbujas de oxígeno en el ánodo y de hidrógeno en el cátodo. Estas burbujas, al ascender, ayudan a acumular, flotar y concentrar los contaminantes,



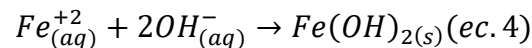
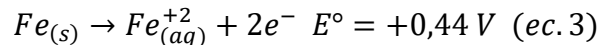
facilitando su remoción eficiente. Las reacciones que se tienen utilizando como electrodo hierro, son las siguientes:

- De forma general, se tiene:

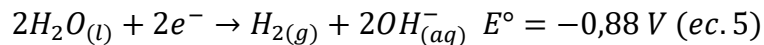


Las reacciones de disociación dependen del medio en el que se encuentren, en un medio básico se tiene:

- Ánodo:

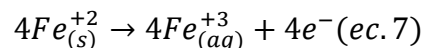
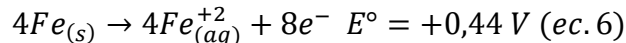


- Cátodo

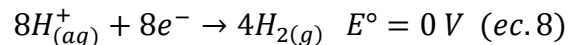


En un medio ácido se tienen las siguientes reacciones:

- Ánodo:

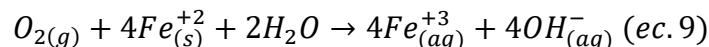


- Cátodo

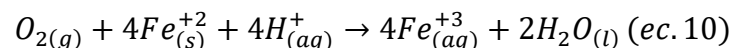


La reacción de oxidación de  $Fe^{+2}$  a  $Fe^{+3}$  en presencia de oxígeno disuelto ocurre de la siguiente manera:

- En medio básico

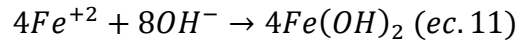


- En medio ácido

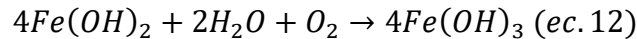


En la solución se forman especies de hierro de la siguiente forma:

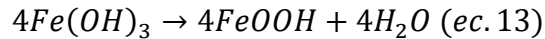
- Formación de Hidróxido Ferroso ( $Fe(OH)_2$ ):



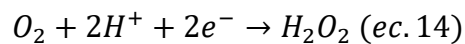
- Formación de  $Fe(OH)_3$  al oxidarse el hidróxido ferroso:



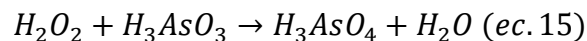
- Conversión a  $FeOOH$ , al deshidratarse  $Fe(OH)_3$  forma oxihidróxido de hierro:



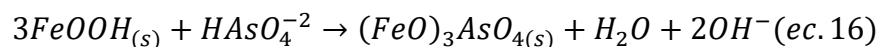
Estas especies sólidas (hidróxidos y oxi-hidróxidos de hierro) son las que facilitan la remoción del arsénico a través de la adsorción y precipitación en el proceso de electrocoagulación. Luego, el oxígeno se puede reducir formando peróxido de hidrógeno en el cátodo o directamente se puede adicionar  $H_2O_2$  para mejorar la eficiencia al favorecer la oxidación de  $As(III)$  a  $As(V)$  (Montefalcon, et al., 2020).



Luego, el peróxido de hidrógeno generado y/o añadido oxida el  $As(III)$  ( $H_3AsO_3$ ) hasta  $As(V)$  ( $H_3AsO_4$ ).



Una vez formado el arseniato  $As(V)$ , este reacciona con los compuestos formados del hierro:



Generando finalmente compuestos insolubles en los que el arsénico queda atrapado en los precipitados de hidróxidos de hierro, facilitando su remoción del agua.

### 2.3 Definición de parámetros

Para lograr una eliminación eficaz de los contaminantes, es esencial ajustar varios parámetros del proceso. Estos incluyen la elección del electrodo, pH, la densidad de corriente, la distancia entre los electrodos y el voltaje aplicado.

### 2.3.1 Elección del electrodo

El material del electrodo es fundamental en el proceso de electrocoagulación, ya que diferentes materiales presentan variaciones en conductividad, resistencia a la corrosión y propiedades eléctricas, lo que impacta directamente en la eficiencia del sistema. En este contexto, es importante distinguir entre el ánodo y el cátodo. El electrodo de sacrificio, encargado de liberar iones metálicos que forman los coagulantes, corresponde al ánodo, el cual se oxida durante el proceso. Por otro lado, el cátodo se encarga de la reducción. La elección del material influye no solo en la formación de coagulantes y burbujas, sino también en el tiempo requerido para el tratamiento. Además, dado que el agua tratada está destinada al consumo humano, es crucial seleccionar materiales no tóxicos que cumplan con los estándares de seguridad para la salud.

En este sentido, se consideran como opciones el hierro y el aluminio. Según estudios realizados por (Kumar, et al., 2004) la comparación de estos dos ánodos muestra que el hierro ofrece la mejor eficiencia en la remoción de arsénico. En la Figura 19 se presenta esta comparación: el hierro alcanza una eficiencia de remoción del 99%, con una concentración total de arsénico inferior a 0,1 mg/l. En contraste, el aluminio logra solo un 37% de eficiencia, con una concentración total de arsénico superior a 0,1 mg/l. Por estas razones, se opta por el hierro como material para el ánodo, mientras que para el cátodo se utilizará acero inoxidable.

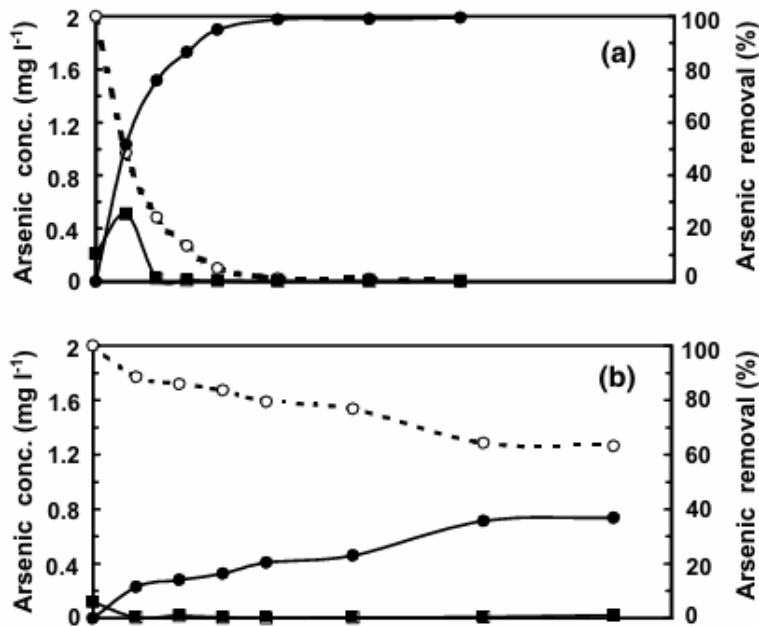


Figura 19. Comparación de electrodos. (a) electrodo de hierro y (b) electrodo de aluminio (Kumar, et al., 2004).

### 2.3.2 pH

El pH tiene un impacto significativo en la eficacia del proceso de electrocoagulación, ya que se relaciona directamente con la solubilidad de los hidróxidos metálicos, lo cual es crucial para la producción de coagulantes eficaces. La solubilidad de los hidróxidos metálicos determina la cantidad de coagulante disponible, afectando así la capacidad de eliminar contaminantes del agua tratada (Bener, et al., 2019).

Para contrastar lo mencionado, un estudio realizado por (Kumar, et al., 2004) evaluó el efecto del pH en la remoción de arsénico utilizando hierro como electrodo en un rango de pH entre 6 y 8. Los resultados mostraron que, en este rango, no se observó una diferencia significativa en la eliminación de As(III) y As(V) y la remoción alcanzó entre el 97% y el 99% de arsénico, lo que sugiere que este rango de pH es adecuado para el tratamiento. Estos resultados se pueden observar en la Figura 20. En otro estudio sobre la eliminación de As(III) realizado por (Haitao, et al., 2024) obtuvieron que a pH altos disminuía su remoción, por lo que, se establecerá un pH de 6,5 para el presente proyecto.

pH	Arsenic type	Coagulant dose as Fe (mg l <sup>-1</sup> )				
		1.8	4.3	10.3	17.0	38.4
		Arsenic removal (%)				
6	As(III)	14	54	86	95	99
	As(V)	21	44	95	98	99
7	As(III)	10	52	90	95	99
	As(V)	35	56	90	99	99
8	As(III)	11	51	74	90	99

Figura 20. Resultados experimentales de la remoción de arsénico a pH 6, 7 y 8 (Kumar, et al., 2004).

### 2.3.3 Densidad de corriente

La densidad de corriente es un parámetro crucial para determinar la eficiencia del proceso, ya que influye en otros sub-parámetros, como la concentración de coagulante, la formación de burbujas y el tamaño y crecimiento de los flóculos. Una mayor densidad de corriente conduce a una disolución más efectiva de los contaminantes en el ánodo, lo que mejora la eficiencia en su remoción; sin embargo, es importante evitar una densidad de corriente excesiva, ya que esto incrementa los costos del tratamiento y puede resultar en una producción excesiva de lodos.



Un estudio realizado evaluó la eficiencia de remoción de arsénico a densidades de corriente de 20,83 A/m<sup>2</sup> y 41,6 A/m<sup>2</sup> (Oza, et al., 2021), observando una mayor eficiencia de remoción con la densidad más alta. Con base en estos resultados, se ha decidido trabajar con una densidad de corriente de 40 A/m<sup>2</sup> para maximizar la eficiencia del proceso.

#### **2.3.4 Distancia entre los electrodos**

La distancia entre electrodos es un parámetro fundamental, ya que, una distancia adecuada garantiza un campo eléctrico uniforme, promoviendo una distribución homogénea de las reacciones químicas y evitando zonas de baja eficiencia.

A partir de lo evidenciado a partir de estudios experimentales (Ahmad, et al., 2022), se tiene que la mayor eficiencia para la distancia entre los electrodos es entre 1 y 1,5 cm. A distancias menores se obtuvo que la eficiencia disminuía, debido al atrapamiento de las burbujas generadas entre el ánodo y el cátodo, resultando como una resistencia a la corriente eléctrica. Al aumentar la distancia entre los electrodos disminuye igualmente la eficiencia debido a que se reduce la formación del campo eléctrico y la transferencia de los iones formados en el reactor. Por lo que, finalmente se escoge una distancia entre los electrodos de 1,5 cm.

#### **2.3.5 Voltaje aplicado**

Se espera que el voltaje aplicado en el proceso de electrocoagulación sea inferior a 30 V, oscilando generalmente entre 15 y 25 V (Vaiyakone , et al., 2019). Este valor depende de diversos factores para una densidad de corriente específica, como la distancia entre electrodos, ya que a mayor distancia aumenta la resistencia del electrolito, lo que requiere un mayor voltaje para mantener la densidad de corriente deseada. El material del ánodo también juega un papel importante, pues diferentes materiales poseen resistividades y propiedades electroquímicas que afectan la eficiencia y la generación de coagulantes; en este caso, el uso de hierro es determinante. Además, el tratamiento superficial del electrodo, que define su superficie inicial según su limpieza o pasivación, impacta directamente en la reacción electroquímica y, por ende, en el voltaje necesario para mantener la densidad de corriente. Finalmente, para garantizar un margen de seguridad y la eficacia del proceso, se establecerá un voltaje de operación de 25 V.

En la Tabla 3, se presenta un resumen con los parámetros escogidos:

Tabla 3. Parámetros establecidos

Parámetros	Elección
Ánodo	Hierro (Fe)
Cátodo	Acero inoxidable
pH	6,5
Densidad de corriente	40 A/m <sup>2</sup>
Distancia entre electrodos	1,5 cm
Voltaje aplicado	25 V

## 2.4 Diagrama del proceso

El proceso de la planta se representa en el diagrama de bloques mostrado en la Figura 21. Este inicia con la recepción del agua a tratar, que pasa primero por una etapa de desbaste para eliminar sólidos gruesos. Posteriormente, el agua ingresa a un equalizador donde se ajusta el pH utilizando HCl, seguido de un sistema de electrocoagulación para la remoción de contaminantes. En esta etapa, es importante destacar que el As(III) necesita oxidarse a As(V) para ser removido eficazmente, ya que el intermediario de hierro que participa en el proceso solo es afín al As(V). Luego, el flujo pasa por un segundo equalizador para estabilizar las condiciones del flujo. A continuación, se lleva a cabo un proceso de filtración para la eliminación de partículas residuales. Finalmente, el agua tratada pasa por una etapa de cloración, donde se adiciona NaOCl para asegurar su desinfección antes de su disposición o uso.

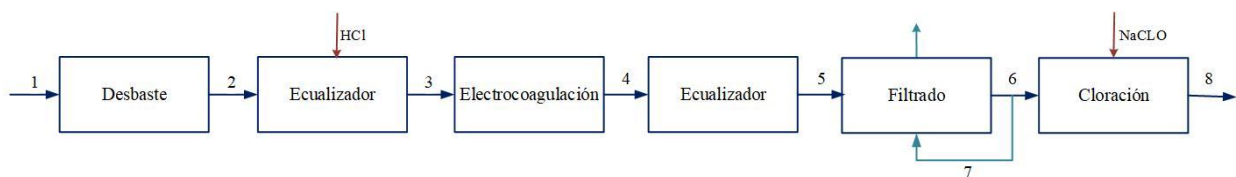


Figura 21. Diagrama de bloques del proceso.



## 2.5 Descripción del proceso

El proceso de tratamiento de agua descrito está diseñado para remover el arsénico de manera eficiente, utilizando una serie de etapas que permiten mejorar gradualmente la calidad del agua hasta alcanzar los estándares necesarios. Cada etapa del proceso cumple una función específica y contribuye a la preparación del agua para la siguiente fase, asegurando así un tratamiento completo y optimizado. A continuación, se detalla cada una de estas etapas:

- **Desbaste:** El proceso comienza con la etapa de desbaste, donde el agua recibida pasa por un sistema diseñado para eliminar sólidos grandes o gruesos, como piedras y otros desechos que podrían interferir en las etapas posteriores. Este equipo es esencial para proteger los equipos más delicados de daños mecánicos y para evitar obstrucciones. Además, al remover sólidos grandes en esta fase inicial, se mejora la eficiencia de los procesos posteriores al reducir la carga de partículas.
- **Ecuador:** Luego, el ecuador se utiliza para ajustar el pH del agua cuando este es mayor al establecido para el tratamiento. En esta etapa, se dosifica ácido clorhídrico (HCl) para reducir el pH al rango óptimo requerido para el proceso de electrocoagulación. El sistema cuenta con un agitador para garantizar una mezcla homogénea y sensores de pH en línea que monitorean continuamente las condiciones del agua, permitiendo realizar ajustes precisos en la dosificación del ácido. Este ajuste es crucial para optimizar la eficiencia del tratamiento y asegurar la remoción adecuada de contaminantes
- **Electrocoagulación:** A continuación, el agua pasa al sistema de electrocoagulación, donde se aplica una corriente eléctrica a través de electrodos de hierro. Esto genera coagulantes in situ, que aglomeran los contaminantes suspendidos, facilitando su posterior separación. La electrocoagulación permite una eliminación efectiva arsénico, que de otro modo sería difícil de remover. Es especialmente útil en la formación de flóculos grandes que se eliminaran fácilmente en las etapas siguientes.
- **Ecuador:** Después de la electrocoagulación, el agua se dirige al ecuador. Este equipo ayuda a estabilizar tanto el flujo como las propiedades fisicoquímicas del agua, manteniendo una alimentación homogénea para las etapas subsiguientes. El ecuador es fundamental para asegurar la consistencia en el tratamiento, ya que absorbe variaciones en el caudal y composición del agua, lo que protege la etapa de filtración de fluctuaciones que podrían reducir su eficiencia.

- **Filtrado:** Luego de la sedimentación, el agua es conducida a un sistema de filtración donde se retienen las partículas finas que aún pueden estar presentes. Esta etapa es crítica para obtener un agua limpia y clara. El filtro asegura la eliminación de partículas finas, esto mejora la calidad del agua tratada, dejándola libre de partículas que podrían causar turbidez o interferir con la desinfección.
- **Cloración:** Finalmente, el agua pasa a la etapa de cloración, en la que se dosifica cloro o compuestos clorados para la desinfección del agua, eliminando microorganismos y bacterias que pudieran representar un riesgo sanitario. La cloración es una etapa esencial para asegurar que el agua tratada sea segura para su disposición o uso, ya que garantiza la eliminación de agentes patógenos.
- **Disposición o uso final:** Tras la cloración, el agua tratada se encuentra lista para su disposición final, la cual se realizará en estanques de almacenamiento.

## 2.6 Balance de masa

Para satisfacer la necesidad de suministro de agua potable de la comuna de Colchane, que actualmente no tiene acceso directo a este recurso, se plantea un objetivo de producción de 57 m<sup>3</sup>/día de agua tratada. Tomando en cuenta las pérdidas inherentes al funcionamiento de los equipos, se considera procesar un volumen total de agua de 61 m<sup>3</sup>/día.

El proceso de tratamiento comienza con una concentración inicial de arsénico de 10.000 µg/L y un nivel de sólidos suspendidos de 5 mg/L en el agua cruda. A través de las etapas del sistema de tratamiento, se logra reducir estas concentraciones a niveles que cumplen con la normativa chilena: una concentración final de arsénico total inferior a 10 µg/L y un contenido de sólidos suspendidos de 1,6 mg/L. En la Tabla 4, se presenta el detalle del balance de masa para cada equipo.

Tabla 4. Balance de masa.

Corriente	Unidad	Salida Desbaste	Salida ecualizador	Salida Electrocoagulación	Salida ecualizador	Salida Filtrado	Agua de lavado filtrado	Salida Cloración
Caudal Diario	m <sup>3</sup> /día	61	61	61	61	57	4	57
Caudal Horario	m <sup>3</sup> /h	7,6	7,6	7,6	7,6	7,1	0,5	7,1

Caudal	L/s	2,1	2,1	2,1	2,1	2,0	0,1	2,0
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	5	5	15	15	2	206	2
Arsénico disuelto	μg/L	10.000	10.000	10	10	10	10	10

## 2.7 Dimensionamiento de equipos

### 2.7.1 Equipo de desbaste

Para este equipo se utilizará una reja de desbaste circular automática (Fig. 22) con un caudal máximo de 15 m<sup>3</sup>/h de material de acero inoxidable AISI-304. Las dimensiones del canal de la rejilla del desbaste son de 300 mm de ancho y 400 mm de altura con un peso del equipo de 80 kg y un consumo de 0,37 kW (ACO Remosa, 2024).

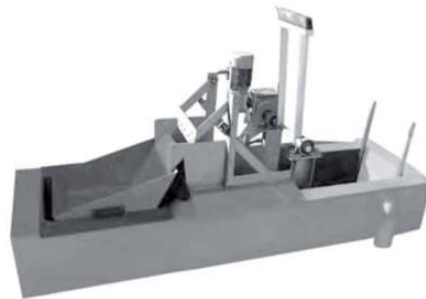


Figura 22. Desbaste circular automático.

### 2.7.2 Celdas de electrocoagulación

Al ser un proceso batch, se necesita calcular el tiempo de reacción que se tendrá dentro de cada reactor, el cual será determinado con la Ley de Faraday, definida anteriormente. En donde es necesario calcular la intensidad de corriente y la masa de hierro necesaria para remover el arsénico. Cada reactor tratará 1,1 m<sup>3</sup> por ciclo. Aplicando un factor de seguridad del 20%, cada reactor será de 1,2 m de diámetro y 1,2 m de altura. Luego, se determina el área de cada electrodo, en donde se utilizarán planchas de acero A36 para el ánodo y plancha de acero inoxidable A304L para el



cátodo. Las medidas del ánodo y cátodo son de 3 mm de espesor, un largo de 0,89 m y de ancho 1,1 m. Con estos datos, se determina el área efectiva del electrodo, de la siguiente forma:

$$\text{Área anódica} = 2 \cdot 0,89 [m] \cdot 1,1[m] + 2 \cdot \frac{3}{1000} [m] \cdot 0,89 + \frac{3}{1000} [m] \cdot 1,1 = 1,97[m^2]$$

Al tener definida la densidad de corriente y el área del electrodo, se calcula la intensidad de corriente que se utilizará en el proceso, con la definición de densidad de corriente ( $j$ ), que corresponde a la intensidad de corriente ( $I$ ) por unidad de área ( $A$ ):

$$j = \frac{I}{A} \text{ (ec. 17)}$$

$$I = j \cdot A = 40 \left[ \frac{A}{m^2} \right] \cdot 1,97 [m^2] = 78,83[A]$$

Se tiene una eficiencia de corriente del 90%, en donde, el resto se consumirá en otras reacciones, por lo tanto, la intensidad de corriente que se tiene es de 78,70 A (Muñoz Mesa & Velásquez Reyes, 2022).

Ahora, se calcula la cantidad de masa de hierro necesaria para remover el arsénico y cumplir con la normativa chilena. Para esto primero se calcula la cantidad de arsénico presente en  $1,1 \text{ m}^3$ , considerando que el total de arsénico es de  $10.000 \mu\text{g/L}$ .

Cantidad de arsénico total en un reactor:

$$As_{total} = \frac{1,1[m^3] \cdot 10^6 \cdot 10.000 \left[ \frac{\mu\text{g}}{L} \right]}{1.000 * 1.000.000} = 11 [gr] \text{ de } As_{total}$$

Considerando que se tiene un 60% de arsenito, se tiene:

$$As(III)_{total} = 11 [g] * 0,6 = 6,6 g \text{ de } As(III)$$

Por lo tanto, el resto corresponde a  $As(V)$ :

$$As(V)_{total} = 11[g] - 6,6[g] = 4,4 [g] \text{ de } As(V)$$



Con el peso molecular del arsénico se calculan los moles de cada uno y estequiométricamente, con las reacciones se obtiene la cantidad de hierro necesaria:

$$\text{Moles As(III)} = 6,6[g] \cdot 74,92 \left[ \frac{g}{\text{mol}} \right] = 0,088 \text{ moles de As(III)}$$

$$\text{Moles As(V)} = 4,4[g] \cdot 74,92 \left[ \frac{g}{\text{mol}} \right] = 0,059 \text{ moles de As(V)}$$

Utilizando la ecuación 15, se calcula cuanto se convierte de arsenito a arsenato. Al ser una relación 1:1, se tiene que los 0,088 moles de As(III) se convierten a As(V). Con la ecuación 16, se calcula cuanto se necesita de FeOOH para precipitar el As(V) que se tiene considerando lo que se convirtió de arsenito a arsenato y el arsenato que ya se encontraba presente.

$$\text{As(V)}_{\text{total}} = 0,088 + 0,059 = 0,1468 \text{ moles de As(V)}$$

Al ser una relación 3:1, se tiene que los moles totales de FeOOH son 0,44 moles. Ahora, utilizando las ecuaciones 13, 12 y 7 se obtiene el hierro necesario para remover el arsenito, las cuales son relaciones 1:1, por lo que, se necesita finalmente, 0,44 moles de Fe. El cual, al multiplicarlo por su peso molecular, nos da la masa de hierro que se necesita.

$$\text{Masa de hierro} = 0,44 \text{ moles} \cdot 55,85 \left[ \frac{gr}{\text{mol}} \right] = 24,6 \text{ gr de hierro}$$

Ahora, utilizando la ecuación 1 se obtiene el tiempo de electrocoagulación. Se utiliza un valor de  $z=3$  al estar el hierro en un estado de oxidación  $\text{Fe}^{+3}$ .

$$t = \frac{z \cdot F \cdot m}{I} = \frac{3 \cdot 96.485 \left[ \frac{C}{\text{mol}} \right] \cdot \frac{24,6[gr]}{55,85 \left[ \frac{gr}{\text{mol}} \right]}}{78,7[A]} = 1.620[s] \cdot \frac{1[min]}{60[s]} = 27[min]$$

Finalmente se consideran 30 minutos de reacción. Se considera también, un tiempo de carga y de descarga de 30 minutos, por lo que, el ciclo total de un reactor corresponde a 1 hora.

Para saber cuántos reactores se necesitan para cumplir con la producción diaria, se considera un tiempo de operación de la planta de 8 horas, por lo que, el número de reactores queda definido por el ciclo total de cada reactor y la producción requerida para cumplir con la demanda del proyecto:

$$N^{\circ}reactores = \frac{Producción}{\frac{V_{reactor}}{t_{ciclo}} \cdot t_{operación}} = \frac{61[m^3/día]}{\frac{1,1[m^3]}{1[h]} \cdot 8[h]} = 6,9 reactores$$

Por lo que, finalmente se necesitaran 7 reactores con una producción de 57 m<sup>3</sup>/día. En la Figura 23, se presentan celdas de electrocoagulación utilizada en laboratorio.



Figura 23. Celdas de electrocoagulación.

### 2.7.3 Ecuador

Se utilizará un estanque de acero inoxidable como ecualizador (Fig. 24), con un diámetro y una altura de 2,3 m. Este ecualizador ha sido diseñado considerando el flujo instantáneo que recibe, correspondiente al caudal proveniente de las descargas de las celdas de electrocoagulación. Durante el ciclo de operación de cada reactor, que tiene una duración total de 1 hora, se estima que 15 minutos están destinados al llenado de este estanque. Además, el ecualizador está diseñado para garantizar una alimentación continua y uniforme al equipo que sigue en la línea de tratamiento.



*Figura 24. Estanque ecualizador.*

#### **2.7.4 Filtro**

Se empleará un filtro multimedio para este equipo, compuesto por un lecho filtrante de varias capas de medios granulares, como se observa en la Figura 25. En este sistema, las partículas suspendidas quedan atrapadas en los intersticios del lecho, mientras que el agua filtrada fluye hacia la salida ubicada en la parte inferior.

El filtro tiene un diámetro de 0,9 m y una altura de 1,8 m, con un medio filtrante formado por antracita, arena y granate. Este equipo está diseñado para tratar un caudal máximo de 9,8 m<sup>3</sup>/h, requiriendo un flujo para el retro-lavado de 24 m<sup>3</sup>/h cada 8 horas, lo que permite obtener una recuperación del 93%. Además, se contará con un estanque para los lodos que serán tratados por servicios terciarios cada 15 días, este estanque tiene dimensiones de 4,5 m de diámetro y altura.



Figura 25. Filtro multimedio.

### 2.7.5 Estanque de cloración

El estanque de cloración tendrá dimensiones de 4,4 m de altura y 4,4 m de diámetro y será fabricado en acero inoxidable para garantizar la resistencia a la corrosión y la durabilidad frente a las condiciones del proceso (Fig. 26). El diseño incorpora un factor de seguridad del 20%, permitiendo manejar variaciones en la operación y asegurar un funcionamiento seguro en condiciones extremas.

El sistema de cloración empleará hipoclorito de sodio ( $\text{NaOCl}$ ) como agente desinfectante, con una dosis planificada de 1 mg/L para garantizar la eliminación efectiva de microorganismos en el agua tratada (Aquaquimi, 2023). Esta concentración es adecuada para aplicaciones de potabilización o desinfección, asegurando que el cloro residual cumpla con los estándares requeridos y minimizando los riesgos asociados a subproductos de la desinfección.



Figura 26. Estanque de cloración.

### 2.7.6 Bombas

Se utilizarán bombas centrífugas, presentadas en la Figura 27. La potencia requerida por ellas es calculada desde un perfil hidráulico que se realiza, el cual se observa en la Figura 28. Se toma en consideración que se necesita extraer el agua desde un pozo a 20 m bajo tierra, que el filtro necesita una presión de entrada de 2 bar y estos tienen una caída de presión de 0,5 bar (Puritec, 2024).



Figura 27. Bomba centrífuga.

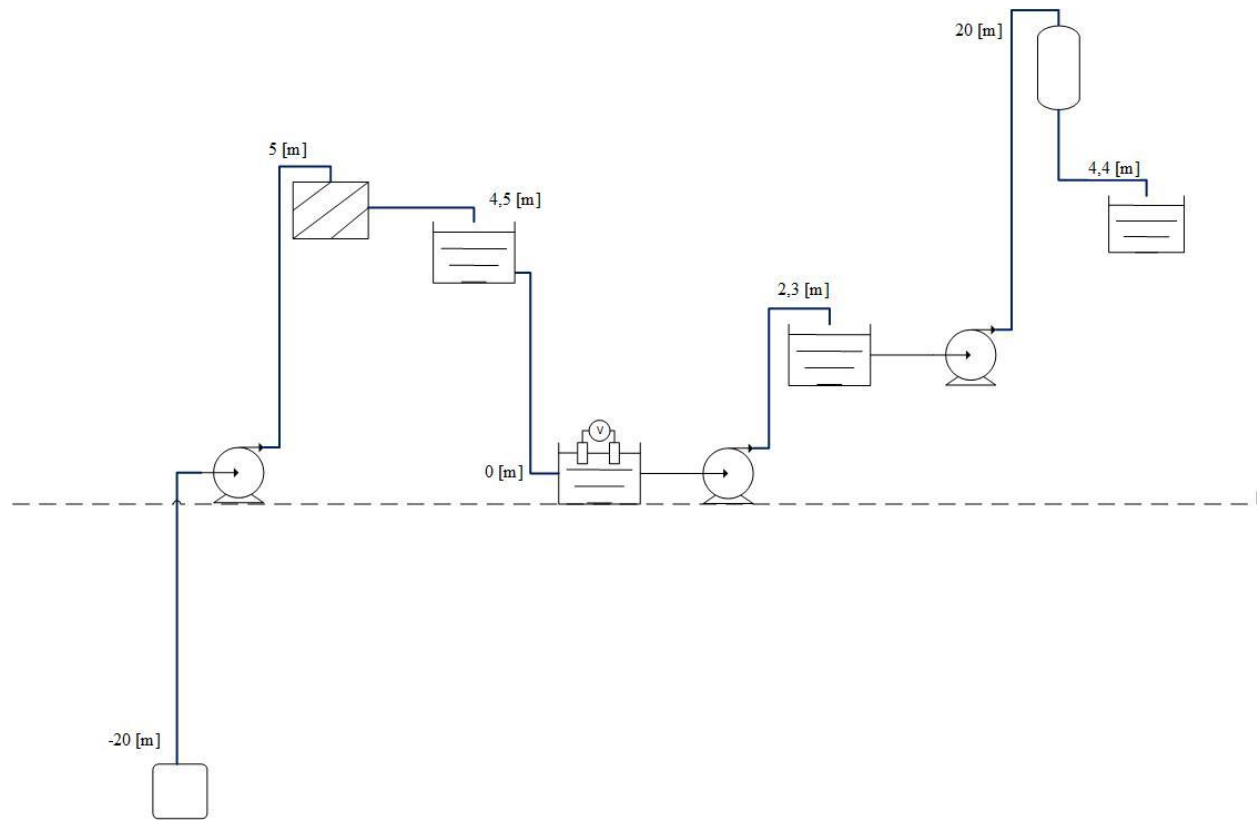


Figura 28. Perfil hidráulico del proceso.

Por lo tanto, la potencia de cada bomba se calcula con la siguiente formula:

$$P_{hidráulica} = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \quad (ec. 18)$$

$$P_{bomba} = \frac{P_{hidraulica}}{\eta} \quad (ec. 19)$$

En donde:

- $\rho$  = Densidad del fluido ( $1000 \text{ kg/m}^3$ )
- $g$  = Aceleración de la gravedad ( $9,81 \text{ m/s}^2$ )
- $Q$  = Caudal ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
- $H$  = altura dinámica (m)
- $\eta$  = Eficiencia de la bomba (se utilizará una eficiencia del 50%, según la Figura 34, presentada en Anexos (Peters, et al., 2003).

Obteniendo finalmente los resultados de la Tabla 5 para cada bomba.

Tabla 5. Potencia de cada bomba

	Altura (m)	Potencia hidráulica (kW)	Potencia Bomba (kW)
Bomba 1	25	0,5	1,0
Bomba 2	2,3	0,05	0,1
Bomba 3	18	0,4	0,7

## 2.8 Servicios

Para llevar a cabo el proceso planteado de tratamiento de agua, se requiere el suministro de corriente eléctrica, para lo cual se considera el consumo energético necesario para el funcionamiento de los equipos involucrados, incluyendo el sistema de desbaste, las celdas de electrocoagulación, el filtro y las bombas, los cuales dependen directamente de la energía eléctrica para su operación eficiente.

La potencia requerida para una celda de electrocoagulación se calcula con la siguiente ecuación:

$$P = V \cdot I \text{ (ec. 20)}$$

En donde, P es la potencia, V el voltaje aplicado e I es la intensidad de corriente, por lo tanto:

$$P = \frac{30[V] \cdot 78,7[A]}{1000} = 2,36 [kW]$$

La potencia que consumen en total las celdas de electrocoagulación es:

$$P_{total} = 2,36[kW] \cdot 7 [\text{reactores}] = 16,5 [kW]$$

Finalmente, en la Tabla 6, se presenta la potencia total consumida por cada equipo.

Tabla 6. Detalle potencia consumida por equipo.

Equipo	Consumo (kW)
Desbaste	0,37
Celdas de electrocoagulación	16,5

Filtro multimedio	3,3
Bomba 1	1,0
Bomba 2	0,1
Bomba 3	0,7

## 2.9 Layout de la planta

Para el plano se definen en un terreno de Colchane de aproximadamente 1.150 m<sup>2</sup>, como se muestra en la Figura 29. La superficie de la planta es de aproximadamente 72 m<sup>2</sup> considerando el dimensionamiento de los equipos y el espacio necesario entre ellos. También, se cuenta con área para el estacionamiento, considerando los camiones que retirarán los lodos y para los trabajadores. Se cuenta con una sala de control y monitoreo, en donde se toma en cuenta el espacio para los tableros y controles eléctricos. También, se cuenta con un área destinada para los baños de los trabajadores y un área para una posible expansión futura.



Figura 29. Layout de la planta.



### **3 Evaluación económica**

#### **3.1 Base para la evaluación económica**

##### **3.1.1 Esperanza de vida del proyecto**

Considerando que el crecimiento poblacional en Colchane va en disminución (Muñoz, 2021) pero la crisis hídrica en el norte del país va empeorando, se estima que el proyecto debe perdurar en el tiempo debido a su importancia estratégica en la gestión de los recursos hídricos.

Para llevar a cabo la evaluación económica y establecer un flujo de caja correspondiente, se ha definido un periodo de análisis de 10 años. Este horizonte temporal permite reflejar los beneficios y costos asociados al proyecto de manera adecuada y también se alinea con la vida útil estimada de los equipos involucrados en el proceso. Esto asegura que la proyección económica sea lo más precisa y representativa posible para la toma de decisiones.

##### **3.1.2 Proyecciones de producción**

Se decide aumentar la proyección del agua tratada en un 3% anual durante el horizonte de evaluación de 10 años, a pesar de la disminución proyectada de la población objetivo. Esta decisión se basa en la necesidad de garantizar un suministro continuo y confiable que cumpla con los estándares de calidad establecidos, priorizando la sostenibilidad del sistema a lo largo del tiempo. Mantener la capacidad máxima operativa facilita la gestión del proceso, asegura la disponibilidad de agua frente a variaciones inesperadas en la demanda y permite considerar la posible expansión del servicio a comunidades cercanas.

##### **3.1.3 Precio de venta**

El precio de venta se estimó considerando los costos de producción del proyecto. Este enfoque garantiza que el precio fijado cubra todos los costos operativos (OPEX) y de mantenimiento, al tiempo que asegura un margen de utilidad adecuado para la sostenibilidad financiera del proyecto. Al determinar el precio de venta basado en los costos de producción, se busca mantener un equilibrio entre la competitividad en el mercado y la viabilidad económica del sistema. Por lo que, el precio de venta finalmente es de 4.900 CLP/m<sup>3</sup>.



### 3.1.4 Antecedentes financieros (impuestos, alternativas de financiamiento, tasas de descuento)

Los antecedentes financieros corresponden a la situación financiera actual de la empresa y las opciones disponibles para su financiamiento, en donde se consideran los impuestos, las alternativas de financiamiento y la tasa de descuento aplicada.

- **Impuestos:** Se considera el Impuesto a la Renta de Primera Categoría, que aplica a las rentas generadas por el capital y otras fuentes, incluidas las provenientes de empresas industriales. Para este caso, la tasa impositiva correspondiente es del 27% (Servicio de Impuestos Internos, 2024). Este impuesto regula los ingresos obtenidos por el contribuyente a través de actividades comerciales realizadas durante el año, derivados de la explotación de bienes y servicios sujetos a la Primera Categoría.
- **Financiamiento:** Se contará con un financiamiento del 50% del capital requerido, equivalente a un préstamo de \$95.157.824, que será pagado en un plazo de 5 años con una tasa de interés del 9,42% anual (Banco Central de Chile, 2024). Este esquema de financiamiento permitirá distribuir parte de los costos iniciales del proyecto, facilitando su implementación y asegurando una gestión económica adecuada a lo largo del tiempo.
- **Inflación:** Se considera una tasa de inflación anual del 3% (Banco Central de Chile, 2024), la cual será aplicada en las proyecciones económicas para reflejar el incremento esperado en los costos operativos y otros factores financieros a lo largo del horizonte de evaluación de 10 años.
- **Tasa social de descuento:** La tasa de descuento es el coste de capital aplicado para determinar el valor presente de un pago futuro, se utiliza para evaluar la viabilidad financiera del proyecto, la cual refleja el costo de capital y riesgo asociado al proyecto. Este valor no puede ser inferior a 7% ni superior a 10% (Gobierno de Chile, 2018). Se ha seleccionado una tasa social de descuento del 8%, considerando que el proyecto presenta riesgos moderados y está orientado a mejorar la calidad de vida de las personas, alineándose con su impacto social positivo y su carácter sostenible.

### 3.1.5 Moneda utilizada para la evaluación

Para la evaluación económica del proyecto, se ha decidido utilizar el peso chileno (CLP) como moneda base. Esta elección se fundamenta en que la mayoría de los costos operativos, como



electricidad, mano de obra y mantenimiento, así como los posibles ingresos, estarán denominados en esta moneda. Además, trabajar en CLP facilita la interpretación y seguimiento financiero a nivel local, minimizando la exposición a fluctuaciones del tipo de cambio. Esta decisión asegura una evaluación coherente y alineada con el contexto económico nacional.

### 3.1.6 Materias primas y Servicios y sus proyecciones.

Las materias primas corresponden al hipoclorito de sodio utilizado en la etapa de cloración, el ácido clorhídrico utilizado para ajustar pH y también los materiales para el cátodo y ánodo, los cuales se considera con un cambio cada 6 meses para cada reactor. Las especificaciones de las materias primas junto con el costo anual de cada una se encuentran en la Tabla 7. Finalmente, se tiene un gasto total en materia prima de \$6.848.673.

Tabla 7. Especificaciones materia prima.

Materia prima	CLP/anual
Hipoclorito de sodio	\$90.979
Ácido clorhídrico	\$830.500
Ánodo	\$851.424
Cátodo	\$5.075.770
<b>Total</b>	<b>\$6.848.673</b>

El servicio utilizado principalmente es la corriente eléctrica para el funcionamiento de los equipos con un consumo total de 22 kW el cual proveerá del servicio privado de la compañía “CGE”, a partir de la tarifa de suministro eléctrico para la comuna de Colchane, con tarifas de tipo BT2 y BT3 ya que son las correspondientes a las empresas y clientes industriales, siendo este valor de 124 CLP/kWh consumida (CGE, 2024). Por lo que, finalmente se tiene un costo anual de 7.987.366 CLP/año. Para la proyección de los costos asociados a materias primas y servicios, se ha considerado la tasa de inflación anual del 3%, mencionada anteriormente.

### 3.1.7 Criterios de devaluación

Para calcular la devaluación de los bienes, se empleará el método de depreciación lineal. Este enfoque distribuye de manera uniforme el costo del activo a lo largo de su vida útil, lo que significa



que cada año se depreciará una cantidad constante hasta que el valor del activo alcance su valor residual. Tabla 8, se presenta la vida útil de los equipos, instrumentación, tuberías y edificios, información obtenida a través del Servicio de Impuestos Internos (SII, 2003) junto con su depreciación lineal. Finalmente, se tiene un valor de depreciación de \$6.398.378.

Tabla 8. Depreciación lineal.

Ítem	Vida útil contable	Depreciación lineal
Desbaste	15	\$ 326.720
Ecualizador	15	\$ 1.302.667
Celdas de electrocoagulación	15	\$ 905.882
Filtro multimedio	15	\$ 172.127
Ecualizador	15	\$ 897.059
Bomba 1	15	\$ 195.400
Bomba 2	15	\$ 195.400
Bomba 3	15	\$ 195.400
Cloración	15	\$ 3.256.667
Instrumentación	15	\$ 101.502
Tuberías	18	\$ 422.924
Edificios (incluidos servicios)	10	\$ 380.631
<b>Total</b>	-	<b>\$ 6.398.378</b>

### 3.2 Estimación CAPEX

La estimación del CAPEX corresponde al cálculo del gasto de capital necesario para la implementación del proyecto. Este valor incluye tanto los costos directos relacionados con la adquisición e instalación de infraestructura, como los costos indirectos asociados a servicios complementarios y contingencias.



### 3.2.1 Lista de inversiones

La inversión inicial contempla los costos directos, que incluyen la adquisición de equipos, su instalación, instrumentación, tuberías, sistema eléctrico, edificaciones, posibles mejoras al terreno, instalaciones de servicios, y la compra del terreno, como se detalla en la Tabla 9. Asimismo, se consideran los costos indirectos, que abarcan los gastos asociados a ingeniería, construcción, asuntos legales, honorarios contractuales y un fondo para posibles contingencias, también presentados en la Tabla 10 (Peters, et al., 2003). En total, la inversión requerida es de \$165.890.647.

Tabla 9. Costos directos.

Costo directo	Total
Equipos	\$ 66.356.259
Instalación	\$ 24.741.034
Instrumentación	\$ 5.709.469
Tuberías	\$ 7.612.626
Sistema eléctrico	\$ 7.612.626
Edificios (incluidos servicios)	\$ 3.806.313
Mejoras en el terreno	\$ 3.806.313
Instalaciones de servicio	\$ 15.225.252
Terreno	\$ 3.806.313



Tabla 10. Costos indirectos.

Costos indirectos	Total
Ingeniería y supervisión	\$ 7.612.626
Gastos de construcción	\$ 19.031.565
Gastos legales	\$ 1.903.156
Contratos de honorarios	\$ 3.806.313
Contingencia	\$ 9.515.782

### 3.2.2 Detalles del costo financiero

Los costos financieros comprenden los intereses y otros cargos derivados del financiamiento requerido para la ejecución del proyecto. Estos incluyen gastos asociados con préstamos bancarios, líneas de crédito y cualquier otro instrumento financiero utilizado para obtener recursos. Como se mencionó anteriormente, se contará con el financiamiento del 50% del capital requerido igual a \$82.945.324 para un periodo de 5 años. Para este proyecto, se realizó el cálculo de la cuota fija, la cual corresponde a un valor de \$21.557.509, junto con la estimación detallada de los intereses y la amortización para cada año del período de financiamiento. Esta última se refiere al monto del capital del préstamo que se devuelve en cada cuota, reduciendo progresivamente el saldo adeudado. El detalle del préstamo de inversión se presenta en la Tabla 11.

Tabla 11. Préstamo de inversión.

Préstamo inversión				
Periodo	Saldo	Cuota	Interés	Amortización
1	\$82.945.324	\$21.557.509	\$7.813.449	\$13.744.059
2	\$69.201.264	\$21.557.509	\$6.518.759	\$15.038.750
3	\$54.162.515	\$21.557.509	\$5.102.109	\$16.455.400
4	\$37.707.115	\$21.557.509	\$3.552.010	\$18.005.498
5	\$19.701.616	\$21.557.509	\$1.855.892	\$19.701.616



### 3.2.3 Capital de trabajo

El capital de trabajo representa el efectivo necesario para cubrir los desfases entre los ingresos y egresos operativos. Su valor depende de la cantidad de días a cubrir y los costos operativos generados por el proyecto. Este monto es considerado un activo permanente del inversionista y, al finalizar el proyecto, es recuperable. Sin embargo, está sujeto al costo de mantener dicho capital inmovilizado durante el período operativo.

Para este proyecto, el cálculo del capital de trabajo se realiza utilizando el método del período de desfase, debido a su simplicidad y adecuación a las características del proyecto. En este caso, no se considera la estacionalidad. La fórmula aplicada es la siguiente:

$$Ct = \frac{\text{Costo Anual}}{365} * N^{\circ} \text{ de días de desfase (ec. 21)}$$

El costo anual es equivalente a todos los costos operativos anuales del proyecto y para el N° de días de desfase, son los días de diferencia entre los ingresos y los egresos, en el cual, para este caso se utiliza un periodo de 30 días. Por lo que, en el flujo de caja proyectado, se considera un capital de trabajo inicial de \$6.831.851. Este monto será necesario en el año 0 y se espera su recuperación total al final del proyecto.

### 3.3 Estimación OPEX

Los costos operativos (OPEX) incluyen los gastos asociados con las actividades diarias de producción o las operaciones comerciales del proyecto. Estos costos comprenden, entre otros, el consumo de materias primas, los costos energéticos, los gastos de transporte y logística, así como los salarios del personal involucrado en las operaciones.

Las remuneraciones se encuentran en la Tabla 12.

Tabla 12. Detalle remuneraciones.

Remuneraciones				
Personal	Cantidad	Sueldo Unitario	Sueldo Total	Sueldo anual
Jefe de planta	1	\$ 1.500.000	\$ 1.500.000	\$ 18.000.000
Operarios	3	\$ 650.000	\$ 1.950.000	\$ 23.400.000
Auxiliares de limpieza	1	\$ 550.000	\$ 550.000	\$ 6.600.000
<b>Total Remuneraciones</b>	-	-	<b>\$ 4.000.000</b>	<b>\$ 48.000.000</b>



El mantenimiento del proyecto abarca todas las actividades necesarias para preservar el correcto funcionamiento y la eficiencia de los equipos, instalaciones y sistemas involucrados. Estas actividades incluyen tanto mantenimiento preventivo como correctivo, asegurando la operatividad del sistema y reduciendo riesgos de fallas inesperadas. A continuación, en la Tabla 13, se presenta un desglose detallado de los costos mensuales y anuales asociados al mantenimiento del proyecto.

*Tabla 13. Detalle mantenimiento del proyecto.*

<b>Mantenimiento</b>	<b>CLP/mensual</b>	<b>CLP/anual</b>
Equipos	\$ 800.000	\$ 9.600.000
Instalaciones	\$ 500.000	\$ 6.000.000
Repuestos	\$ 200.000	\$ 2.400.000
Seguros y licencias	\$ 200.000	\$ 2.400.000
Gestión de residuos	\$ 63.779	\$ 765.344
<b>Total</b>		<b>\$ 21.165.344</b>

El gráfico de la Figura 30 presenta la distribución de los costos operacionales del proyecto, divididos en cuatro categorías principales. Los servicios, que incluyen los gastos de energía, representan \$7.987.366. Los costos de materia prima con un total de \$6.848.673, siendo estos los insumos necesarios para los procesos productivos. Las remuneraciones, que comprenden los salarios y beneficios del personal, constituyen la mayor proporción del gasto total con \$48.000.000. Finalmente, los costos de mantenimiento, que incluyen actividades preventivas, correctivas y otros gastos relacionados con equipos e instalaciones, suman \$21.165.344.

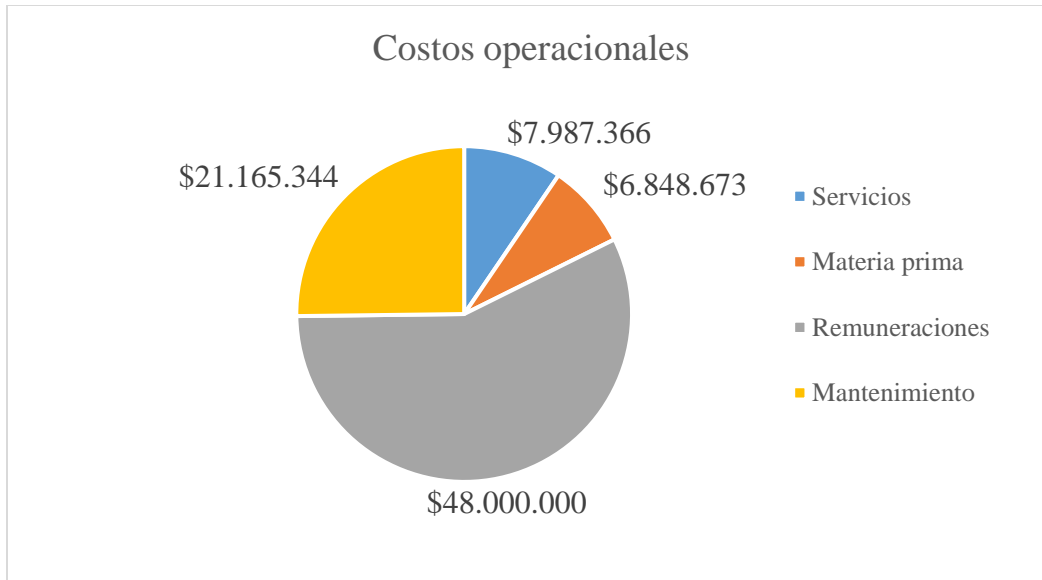


Figura 30. Costos operacionales.



### 3.4 Flujo de caja

El flujo de caja se encuentra detallado en la Tabla 14 y Tabla 15.

Tabla 14. Flujo de caja.

Año	2024	2025	2026	2027	2028
<b>Ingresos</b>		<b>\$101.944.500</b>	<b>\$105.002.835</b>	<b>\$108.152.920</b>	<b>\$111.397.508</b>
Ingresos operacionales		\$101.944.500	\$105.002.835	\$108.152.920	\$111.397.508
Ingresos no operacionales					
<b>COSTOS VARIABLES TOTAL</b>		<b>-\$14.836.039</b>	<b>-\$15.281.120</b>	<b>-\$15.739.554</b>	<b>-\$16.211.741</b>
MATERIAS PRIMAS		-\$6.848.673	-\$7.054.133	-\$7.265.757	-\$7.483.730
SERVICIOS		-\$7.987.366	-\$8.226.987	-\$8.473.797	-\$8.728.011
<b>COSTOS FIJOS TOTAL</b>		<b>-\$75.563.722</b>	<b>-\$77.638.683</b>	<b>-\$79.775.892</b>	<b>-\$81.977.217</b>
MANTENCION		-\$21.165.344	-\$21.800.305	-\$22.454.314	-\$23.127.943
PERSONAL		-\$48.000.000	-\$49.440.000	-\$50.923.200	-\$52.450.896
DEPRECIACION		-\$6.398.378	-\$6.398.378	-\$6.398.378	-\$6.398.378
<b>Intereses</b>		<b>-7.813.449</b>	<b>-6518759,098</b>	<b>-5102108,886</b>	<b>-3552010,224</b>
<b>UAI</b>		<b>\$ 3.731.289</b>	<b>\$ 5.564.273</b>	<b>\$ 7.535.365</b>	<b>\$ 9.656.540</b>
IMPUESTOS (27%)		-\$1.007.448	-\$1.502.354	-\$2.034.549	-\$2.607.266
<b>UTILIDADES DESPUES IMPUESTOS</b>		<b>\$ 2.723.841</b>	<b>\$ 4.061.919</b>	<b>\$ 5.500.817</b>	<b>\$ 7.049.274</b>
CAPITAL DE TRABAJO	-\$6.904.223				
PRÉSTAMO	\$82.945.324				
AMORTIZACIÓN		-\$13.744.059	-\$15.038.750	-\$16.455.400	-\$18.005.498
VALOR RESIDUAL					
DEPRECIACION		\$6.398.378	\$6.398.378	\$6.398.378	\$6.398.378
INVERSIÓN	-82945323,53				
<b>FLUJO NETO</b>	<b>\$ -6.904.223</b>	<b>\$ -4.621.840</b>	<b>\$ -4.578.453</b>	<b>\$ -4.556.205</b>	<b>\$ -4.557.847</b>
<b>FLUJO ACUMULADO</b>	<b>-\$6.904.223</b>	<b>-\$11.526.064</b>	<b>-\$16.104.516</b>	<b>-\$20.660.722</b>	<b>-\$25.218.568</b>

Tabla 15. Flujo de caja (continuación).

Año	2029	2030	2031	2032	2033	2034
<b>Ingresos</b>	<b>\$114.739.433</b>	<b>\$118.181.616</b>	<b>\$121.727.064</b>	<b>\$125.378.876</b>	<b>\$129.140.243</b>	<b>\$133.014.450</b>
Ingresos operacionales	\$114.739.433	\$118.181.616	\$121.727.064	\$125.378.876	\$129.140.243	\$133.014.450
Ingresos no operacionales						
<b>COSTOS VARIABLES TOTAL</b>	<b>-\$16.698.093</b>	<b>-\$17.199.036</b>	<b>-\$17.715.007</b>	<b>-\$18.246.457</b>	<b>-\$18.793.851</b>	<b>-\$19.357.666</b>
MATERIAS PRIMAS	-\$7.708.242	-\$7.939.489	-\$8.177.674	-\$8.423.004	-\$8.675.694	-\$8.935.965
SERVICIOS	-\$8.989.851	-\$9.259.546	-\$9.537.333	-\$9.823.453	-\$10.118.156	-\$10.421.701
<b>COSTOS FIJOS TOTAL</b>	<b>-\$84.244.582</b>	<b>-\$86.579.968</b>	<b>-\$88.985.416</b>	<b>-\$91.463.027</b>	<b>-\$94.014.967</b>	<b>-\$96.643.464</b>
MANTENCION	-\$23.821.782	-\$24.536.435	-\$25.272.528	-\$26.030.704	-\$26.811.625	-\$27.615.974
PERSONAL	-\$54.024.423	-\$55.645.156	-\$57.314.510	-\$59.033.946	-\$60.804.964	-\$62.629.113
DEPRECIACION	-\$6.398.378	-\$6.398.378	-\$6.398.378	-\$6.398.378	-\$6.398.378	-\$6.398.378
<b>Intereses</b>	<b>-1.855.892</b>					
<b>UAI</b>	<b>\$ 11.940.865</b>	<b>\$ 14.402.612</b>	<b>\$ 15.026.641</b>	<b>\$ 15.669.392</b>	<b>\$ 16.331.425</b>	<b>\$ 17.013.319</b>
IMPUESTOS (27%)	-\$3.224.034	-\$3.888.705	-\$4.057.193	-\$4.230.736	-\$4.409.485	-\$4.593.596
<b>UTILIDADES DESPUES IMPUESTOS</b>	<b>\$ 8.716.832</b>	<b>\$ 10.513.907</b>	<b>\$ 10.969.448</b>	<b>\$ 11.438.656</b>	<b>\$ 11.921.940</b>	<b>\$ 12.419.723</b>
CAPITAL DE TRABAJO						\$6.904.223
PRÉSTAMO						
AMORTIZACIÓN	-\$19.701.616					
VALOR RESIDUAL						\$ 6.635.626
DEPRECIACION	\$6.398.378	\$6.398.378	\$6.398.378	\$6.398.378	\$6.398.378	\$6.398.378
INVERSIÓN						
<b>FLUJO NETO</b>	<b>\$ -4.586.407</b>	<b>\$ 16.912.284</b>	<b>\$ 17.367.826</b>	<b>\$ 17.837.034</b>	<b>\$ 18.320.318</b>	<b>\$ 32.357.950</b>
<b>FLUJO ACUMULADO</b>	<b>-\$29.804.975</b>	<b>-\$12.892.691</b>	<b>\$4.475.135</b>	<b>\$22.312.169</b>	<b>\$40.632.487</b>	<b>\$72.990.437</b>



### 3.5 Indicadores económicos del proyecto

#### 3.5.1 VAN

El Valor Actual Neto (VAN) es un indicador financiero fundamental para evaluar la viabilidad de un proyecto de inversión. Este criterio mide la diferencia entre el valor presente de los flujos de caja futuros generados por el proyecto y la inversión inicial requerida. Un VAN positivo indica que el proyecto genera un retorno superior al costo de oportunidad del capital, mientras que un VAN negativo sugiere que el proyecto no es rentable bajo las condiciones evaluadas.

La fórmula para calcular el VAN es la siguiente:

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1+r)^t} - I_o \text{ (ec. 22)}$$

En donde:

$F_t$ : Flujo de caja neto en el período  $t$

$r$ : Tasa de descuento

$t$ : Período de tiempo

$n$ : Vida útil del proyecto

$I_o$ : Inversión inicial del proyecto

Finalmente, el VAN obtenido es de \$27.207.070. Corresponde a un valor positivo lo que se traduce en que la inversión producirá beneficios sobre la inversión inicial requerida siendo un proyecto viable para su inversión.

#### 3.5.2 TIR

La Tasa Interna de Retorno (TIR) es un indicador financiero que mide la rentabilidad de un proyecto de inversión. Es la tasa de descuento que hace que el Valor Actual Neto (VAN) de los flujos de caja proyectados sea igual a cero. En otras palabras, la TIR es la tasa de retorno que un proyecto genera sobre la inversión inicial. Su fórmula es:

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1+TIR)^t} - I_o = 0 \text{ (ec. 23)}$$

La TIR obtenida es del 23%, lo que indica que el proyecto es rentable, ya que supera la tasa de descuento del 8%. Esto demuestra que la rentabilidad del proyecto es mayor que el costo de oportunidad del capital, lo cual respalda su viabilidad financiera.

### 3.5.3 PayBack

El Payback es un indicador financiero que mide el tiempo necesario para recuperar la inversión inicial de un proyecto a través de los flujos de caja generados. Para este caso, se puede observar en la Figura 31, que se tiene un PayBack de 7 años, es decir, en el periodo 7 se comienza a recuperar la inversión inicial del proyecto.

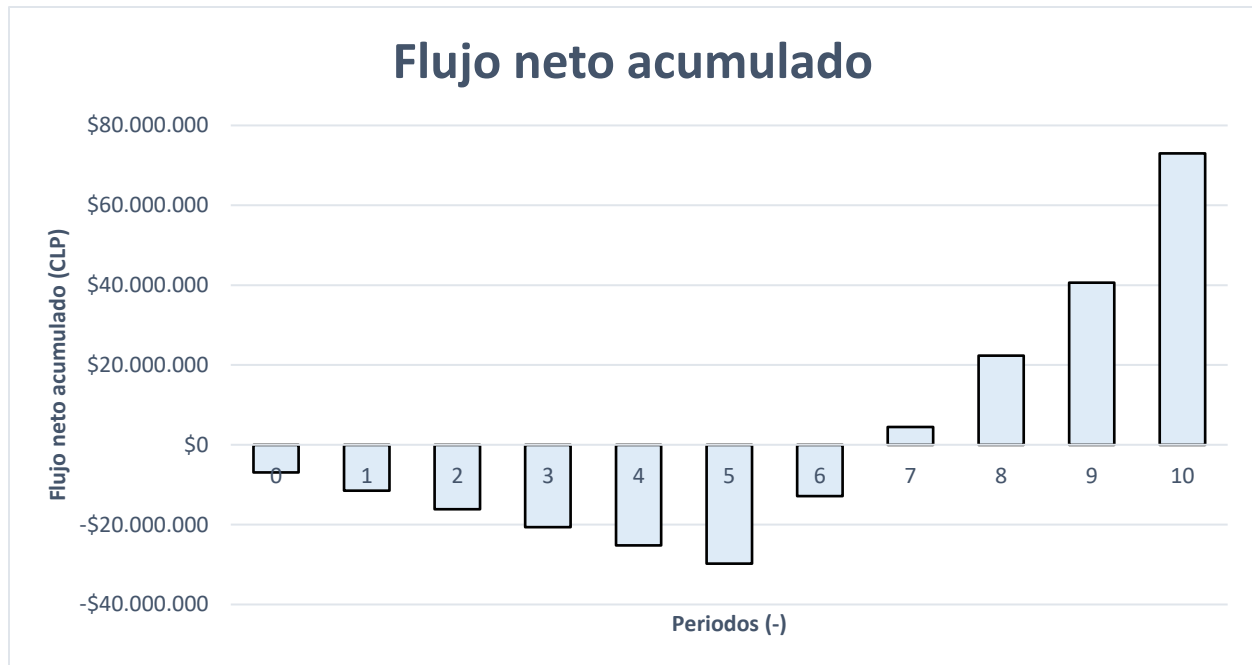


Figura 31. Flujo de caja neto acumulado.

## 3.6 Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad es una herramienta clave para evaluar cómo cambios en las variables críticas del proyecto afectan los resultados financieros. Este análisis permite identificar qué tan robusto es el proyecto ante fluctuaciones externas y proporciona información útil para la toma de decisiones.

### 3.6.1 Análisis de sensibilidad según precio por m<sup>3</sup> de agua.

Este análisis de sensibilidad permite evaluar como afecta la variación en el precio del agua por metro cúbico (m<sup>3</sup>) a los resultados financieros del proyecto, como el Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR).

Primero, se considera como valor inicial el precio actual del agua en la zona norte del país, que corresponde a \$1.498 CLP/m<sup>3</sup> (Super Intendencia de Servicios Sanitarios, 2024). A continuación,

se calcula el valor del agua necesario para que el VAN sea igual a cero, es decir, el precio mínimo que asegura que no haya ganancias ni pérdidas en el proyecto. Posteriormente, se incrementa progresivamente el valor del agua para observar cómo varían los indicadores financieros. En la Figura 32 se presenta el análisis de sensibilidad resultante.

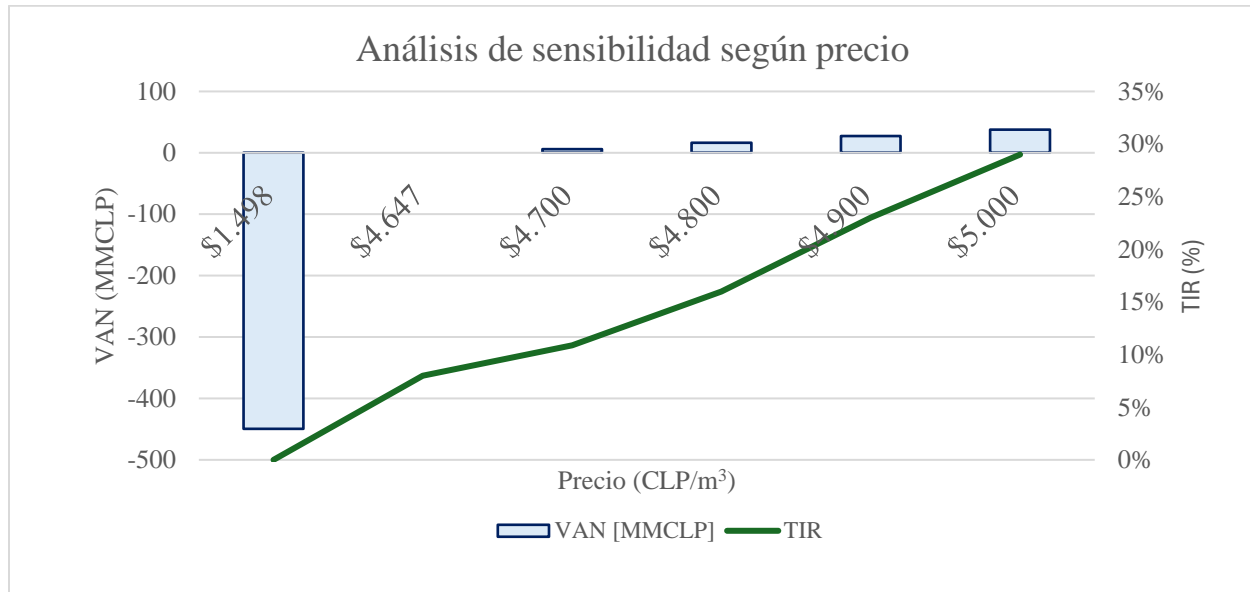


Figura 32. Análisis de sensibilidad según precio.

Como se observa en el análisis de sensibilidad, inicialmente, con un precio de \$1.498 CLP/m³, el VAN es negativo, indicando que el proyecto no es rentable bajo estas condiciones. A medida que el precio aumenta, se observa una mejora progresiva en los indicadores financieros.

El punto de equilibrio se alcanza con un precio de \$4.647 CLP/m³, donde el VAN es igual a cero, es decir, el proyecto no genera ni pérdidas ni ganancias. Por encima de este valor, tanto el VAN como la TIR incrementan significativamente, lo que refleja una mayor rentabilidad del proyecto.

En particular, a precios superiores a \$4.700 CLP/m³, el proyecto comienza a generar un VAN positivo, lo que indica viabilidad financiera. Asimismo, la TIR crece de manera sostenida, superando el 29% con un precio de \$5.000 CLP/m³.

### 3.6.2 Análisis de sensibilidad según aumento de producción

El análisis de sensibilidad permite evaluar el impacto de las variaciones en la producción proyectada sobre el VAN y la TIR. Este análisis es crucial para entender cómo cambios en la capacidad o el volumen de producción afectan la viabilidad económica del proyecto y su rentabilidad. Primero, se analiza el escenario base, en el cual no se incrementa la producción.

Posteriormente, se evalúan escenarios con incrementos progresivos de la producción, aumentando cada 1%, como se presenta en la Figura 33.

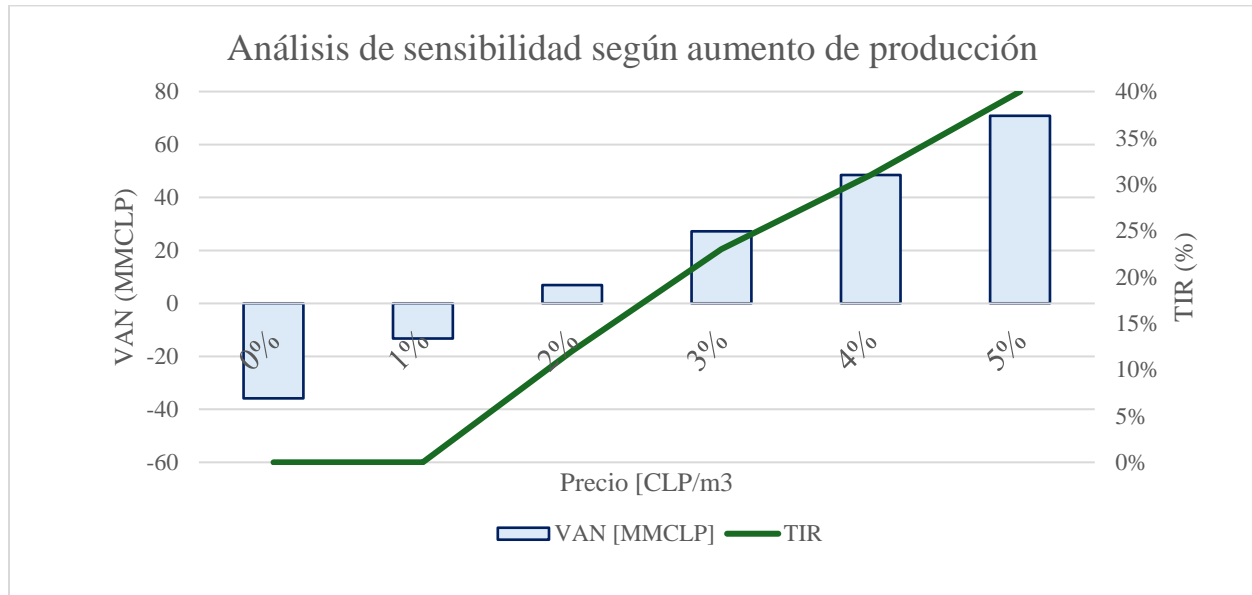


Figura 33. Análisis de sensibilidad según aumento de producción.

Como se presenta en la gráfica, inicialmente, con un escenario sin incremento en la producción (0%), el VAN es negativo, indicando que el proyecto no es rentable en este nivel de producción. Sin embargo, con incrementos progresivos del 1%, 2%, y hasta el 5%, se observa un aumento sostenido tanto en el VAN como en la TIR.

A partir del 1% de incremento en la producción, el proyecto alcanza un VAN positivo, indicando que se ha superado el umbral de rentabilidad. Asimismo, la TIR crece de manera lineal con los aumentos en la producción, alcanzando valores superiores al 30% con un incremento del 4%.



## Conclusiones y recomendaciones

El presente estudio técnico-económico evidencia que la electrocoagulación es una tecnología viable y eficiente para la remoción de arsénico desde aguas naturales, particularmente en regiones con altos niveles de contaminación por este elemento, como es la comuna de Colchane en la Región de Tarapacá. La selección de hierro como material para el ánodo, junto con la optimización de parámetros clave como el pH, la densidad de corriente y la distancia entre electrodos (1,5 cm), permite un diseño robusto del sistema que permite producir un agua que cumple con los límites establecidos por la normativa chilena NCh409.

Desde una perspectiva técnica, el diseño del sistema toma como base las propiedades del agua subterránea de la zona, incorporando etapas complementarias como la filtración y la cloración, para garantizar una calidad final del agua apta para el consumo humano. La planta propuesta tiene la capacidad de tratar un volumen de 57 m<sup>3</sup> de agua al día, que es un flujo suficiente para cubrir las necesidades básicas de la comuna. Además, se destaca la flexibilidad del sistema, que permite adaptarse a condiciones de operación variables, minimizando la generación de residuos secundarios en comparación con tecnologías convencionales.

En términos económicos, los resultados obtenidos indican que el proyecto presenta un Valor Actual Neto (VAN) de \$27.207.070 CLP, una Tasa Interna de Retorno (TIR) del 23%, y un periodo de recuperación de la inversión (payback) de 7 años, siendo un proyecto económicamente viable. Aunque el costo del agua tratada es de 4.900 CLP/m<sup>3</sup>, superior al promedio comercial, este costo se justifica plenamente, ya que el sistema de electrocoagulación representa una solución local y sostenible para mejorar la calidad del agua disponible en la zona.

Adicionalmente, el análisis de sensibilidad reveló que la viabilidad económica del proyecto está influenciada por variaciones en la producción de agua y en el precio de venta; es así como un incremento en la producción anual mejora significativamente la rentabilidad del sistema, mientras que el punto de equilibrio se alcanza con un precio de agua tratada de 4.647 CLP/m<sup>3</sup>. A precios superiores a 4.700 CLP/m<sup>3</sup>, el proyecto genera un VAN positivo y una TIR superior al 11%. Estas proyecciones confirman que el sistema es favorable en escenarios donde los parámetros analizados experimenten variaciones razonables, reflejando su flexibilidad ante diferentes contextos operativos y económicos.

En conclusión, este estudio confirma que la electrocoagulación es una solución técnicamente factible y económicamente viable para la remoción de arsénico en comunidades que enfrentan



dificultades en el acceso a agua potable segura. No obstante, para lograr una implementación exitosa es necesario considerar aspectos clave. Entre ellos, se sugiere evaluar la incorporación de energías renovables, como paneles solares, para optimizar los costos operativos y aprovechar la alta irradiación solar de la región. Además, es fundamental analizar la durabilidad y desempeño de los electrodos en plantas de mayor escala, ya que las condiciones evaluadas a nivel experimental pueden no ser representativas en grandes sistemas. También se requiere implementar plantas piloto para validar el diseño y resolver desafíos relacionados con la distribución uniforme de la corriente, ya que la eficiencia del sistema puede disminuir en volúmenes de agua elevados. Por último, es importante reconocer las limitaciones actuales, como los altos costos iniciales, el mantenimiento periódico de los electrodos y la escalabilidad limitada. Superar estas barreras será clave para garantizar la sostenibilidad y viabilidad del sistema en el largo plazo. En este sentido, la electrocoagulación se posiciona como una tecnología innovadora que combina eficiencia técnica, sostenibilidad y flexibilidad operativa, siendo una alternativa prometedora para mejorar la calidad del agua potable que se encuentra altamente contaminada con arsénico.



## Referencias

- ACO Remosa, 2024. *ACO Remosa*. [En línea] Available at: <https://remosa.net/wp-content/uploads/pdf/ES/Depuracion/catalogo-rejas-desbaste.pdf>
- Aguilar, K., 2005. *Remoción de arsénico en aguas subterráneas de la comarca lagunera*, s.l.: s.n.
- Ahmad, . A., Ebrahimi, . I., bargeshadi, R. & Khorsandi, H., 2022. Removal of arsenite using conventional and enhanced electrocoagulation with aeration and hydrogen peroxide up to drinking water quality standards.. *Springer Link*.
- Akhter, F., Soomro, S., Siddique, . M. & Ahmed, M., 2021. Pollutant Removal Efficiency of Electrocoagulation. *Springer Natura*.
- Amini, y otros, 2008. *Modelado estadístico de la contaminación geogénica global por arsénico en aguas subterráneas*, s.l.: s.n.
- Aquaquimi, 2023. *Aquaquimi*. [En línea] Available at: [https://www.aquaquimi.com/Paginas/Trat\\_agua\\_pot/Desinfeccion%20agua/agua%20potable%20cloro.html](https://www.aquaquimi.com/Paginas/Trat_agua_pot/Desinfeccion%20agua/agua%20potable%20cloro.html)
- Arienzo, M. y otros, 2002. Retention of arsenic on hydrous ferric oxides generated by electrochemical peroxidation. *Chemosphere*.
- Banco Central de Chile, 2024. *bcentral*. [En línea] Available at: <https://www.bcentral.cl/areas/estadisticas/tasas-de-interes>
- Banco Central de Chile, 2024. *bcentral.cl*. [En línea] Available at: <https://www.bcentral.cl/areas/politica-monetaria/informe-de-politica-monetaria>
- Bener, S. y otros, 2019. Electrocoagulation process for the treatment of real textile wastewater: Effect of operative conditions on the organic carbon removal and kinetic study. *ELSEVIER*.
- Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, 2024. *Biblioteca del Congreso Nacional de Chile*. [En línea] Available at: [https://www.bcn.cl/siit/reportescomunales/comunas\\_v.html?anno=2024&idcom=1403](https://www.bcn.cl/siit/reportescomunales/comunas_v.html?anno=2024&idcom=1403)



- Cabrera, M., Pinos, D. & Pulla, M., 2013. Arsénico en el agua.
- Calderón, C. y otros, 2010. *Evaluación técnico-económica de cinco tecnologías para remoción de arsénico*, s.l.: s.n.
- CGE, 2024. *Tarifas de Suministro Eléctrico a Precio traspasable a consumos  $\leq 350$  kWh*, s.l.: s.n.
- Figuroa, E., 2013. *Evaluación de una planta piloto de remoción de arsénico por adsorción mediante un medio agaroso.*, Santiago, Chile: s.n.
- Fluence, 2024. [En línea]  
Available at: <https://www.fluencecorp.com/es/que-es-el-intercambio-ionico/>
- Gobierno de Chile, 2018. *Reglamento de valorización de los sistemas de transmisión*, s.l.: s.n.
- Gobierno Regional Tarapacá, 2023. *Política regional de desarrollo rural de Tarapacá*, s.l.: s.n.
- Haitao, Y. y otros, 2024. Eliminación de alta eficiencia de As(III) de aguas subterráneas utilizando siderita como fuente de hierro en el proceso de electrocoagulación.
- Instituto Nacional de Normalización, 2005. *Norma chile oficial NCh409/1*, s.l.: s.n.
- Kumar, R., Khilar, K., Mahajan & Chaudhari, S., 2004. Removal of arsenic from water by electrocoagulation. *ELSEVIER*.
- Lillo, J., 2008. *Peligros geoquímicos: arsénico de origen natural*, s.l.: s.n.
- MD, K. G., 2013. *Agencia para sustancias tóxicas y el registro de enfermedades*. [En línea]  
Available at: [https://www.atsdr.cdc.gov/es/csem/arsenic/efectos\\_fisiologicos.html](https://www.atsdr.cdc.gov/es/csem/arsenic/efectos_fisiologicos.html)
- Melendes, P., 2022. *TSI Life Science*. [En línea]  
Available at: <https://tecnosolucionescr.net/blog/626-contaminacion-de-metales-pesados-en-aguas-potencial-toxico-para-su-salud-y-el-medio-ambiente>
- Mella, C., 2021. *Contaminación por arsénico geogénico de las aguas subterráneas en Chile*, s.l.: s.n.
- Metcalf & Eddy, 2014. *Wastewater Engineering*. s.l.:s.n.
- Mollah, M. y otros, 2004. Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation. *ELSEVIER*.
- Montefalcon, . M. y otros, 2020. Arsenic Removal by Advanced Electrocoagulation. *Catalysts*.



Müller, D., Stirn, C. & Maier, M., 2021. Arsenic Removal from Highly Contaminated Groundwater by Iron Electrocoagulation. Investigation of Process Parameters and Iron Dosage Calculation. *MDPI*.

Muñoz Mesa, A. M. & Velásquez Reyes, C. A., 2022. *Apropiación funcional de una celda de electrocoagulación con electrodos de hierro para el tratamiento de aguas residuales de la industria textilera*, s.l.: s.n.

Muñoz, A. T., 2021. *Características demográficas y socioeconómicas Comuna de Colchane*, s.l.: s.n.

Organización Mundial de la Salud, 2024. [En línea] Available at: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/arsenic>

Oza, . H., Jampa, . S. & Singh, A., 2021. Removal of arsenic from aqueous solution using combined ultrasonic. *ELSEVIER*.

Pabón, Benítez, Sarria & Gallo, 2021. Contaminación del agua por metales pesados, metodos de análisis y tecnologías de remoción. *Scielo*.

Parga, J. y otros, 2005. Arsenic removal via electrocoagulation from heavy metal contaminated groundwater in La Comarca Lagunera México. *ELSEVIER*.

Peters, M., Timmerhaus , K. & West , R., 2003. *Plant Design and Economics for Chemical Engineers*. s.l.:s.n.

Podgorski, J. & Berg, M., 2020. Amenaza global del arsénico en las aguas subterráneas.

Puritec, 2024. *Manantial Water*. [En línea] Available at: <https://www.manantialwater.com.mx/purificacion/filtracion-multimedia/>

Rodriguez, F., Rezende, V., Moser, P. & Santos, M., 2024. *Arsenic in natural waters of Latin-American countries: Occurrence, risk assessment, low-cost methods, and technologies for remediation*, s.l.: s.n.

Servicio de Impuestos Internos, 2024. [En línea] Available at: [https://www.sii.cl/ayudas/aprenda\\_sobre/3072-1-3080.html](https://www.sii.cl/ayudas/aprenda_sobre/3072-1-3080.html)

SII, 2003. *Tabla de vida útil de los bienes físicos del activo inmovilizado*, s.l.: s.n.



Smedley, 2002. *Una revisión del origen, comportamiento y distribución del arsénico en aguas naturales.*, s.l.: s.n.

Sorlini, S., Carnevale, M., Lazarova, Z. & Collivignarelli, M. C., 2023. Tratamiento electroquímico del arsénico en agua potable: efecto de la concentración inicial de  $As^{3+}$ , pH y conductividad sobre la cinética de oxidación. *Clean Technologies*.

Super Intendencia de Servicios Sanitarios, 2024. *Aguas Altiplano*, s.l.: s.n.

Superintendencia de servicios sanitarios, 2022. [En línea]  
Available at: <https://www.siss.gob.cl/586/w3-article-19900.html>

Superintendencia de Servicios Sanitarios, 2023. *Cuidar el agua en el hogar*, s.l.: s.n.

Superintendencia del Medio Ambiente, 2021. *Análisis de resultados de caracterización de aguas de pozos y canal la maquina agricola San de Peralillo S.A.*, s.l.: s.n.

Varyakone , y otros, 2019. Arsenic Removal using Electrocoagulation Process. *CEST* .

## Anexos

La Figura 34 proporciona valores que son adecuados para las estimaciones de diseño de las eficiencias de las bombas centrífugas, la cual para este caso es del 50% (Peters, et al., 2003).

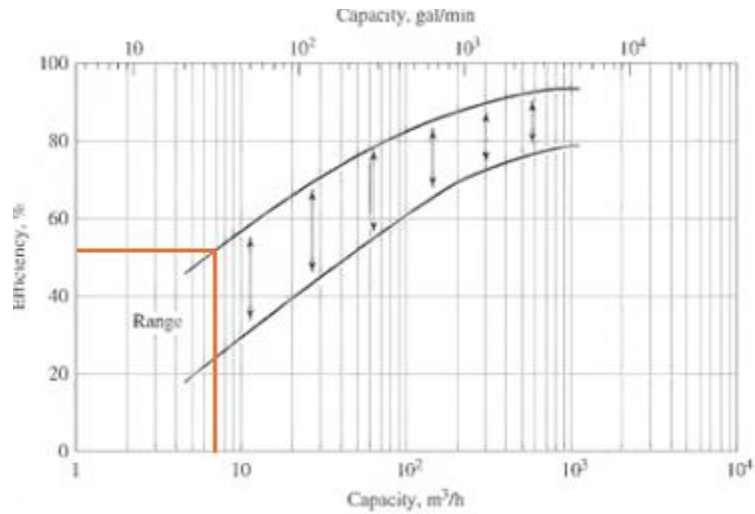


Figura 34. Estimación eficiencia bomba centrífuga.