

Escuela Superior Politécnica del Litoral

Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra

Diseño de sistema avanzado de tratamiento de electrodiálisis para la
remoción de As en agua de consumo doméstico en la ciudad de Santa Rosa,

Ecuador

INGE-2275

Proyecto integrador

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero Civil

Presentado por:

Juan Andrés Cedeño Laje

Guayaquil - Ecuador

Año: 2024

Dedicatoria

A mis padres, por su amor y apoyo inquebrantable que me han brindado a lo largo de mi etapa universitaria.

A través de desafíos y triunfos, su presencia ha sido mi sustento que me ha brindado el impulso necesario para seguir adelante.

Este logro no solo es mío, sino también de ustedes, quienes han contribuido de manera inmensurable a mi formación académica y personal. Mi éxito es un reflejo de la enseñanza y los valores que me han inculcado.

Con profundo amor y agradecimiento

Juan Andrés Cedeño Laje

Agradecimientos

En primer lugar, a Dios por su fidelidad, amor y por brindarme fuerzas para continuar cada día.

A mi tutora PhD. Priscila Valverde, por su guía a lo largo del desarrollo de este proyecto, la cual fue fundamental para su culminación.

Un especial agradecimiento a la PhD. Samantha Jiménez quien, desde el principio, demostró un interés genuino en mi crecimiento profesional y se convirtió en un modelo a seguir.

Al Ing. Jonathan Mendez, Ing. Cristhian Aguilar, Ing. Angie Medina, Ing. Cindy Goyburo, por su orientación y apoyo constante en este proceso.

A mis compañeros de aula, amigos, y próximamente colegas que hicieron de cada día una experiencia memorable, Karla, Arelis, Ivette, Joselynne, Itati, Angie, Luz, y a mi querido amigo Carlos quien cuya amistad ha sido un apoyo constante desde el proceso de admisiones.

Y por último, pero no menos importante, quiero agradecerme a mí mismo por creer en mis capacidades y perseverar a lo largo de este desafiante trayecto.

Juan Andrés Cedeño Laje

Declaración Expresa

“Los derechos de titularidad y explotación, me corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Juan Andrés Cedeño Laje*, doy mi consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”



Juan Andrés Cedeño Laje

Evaluadores



Firmado electrónicamente por:
INGRID TATIANA ORTA
ZAMBRANO

Msc. Ingrid Orta Zambrano

Profesor de materia



Firmado electrónicamente por:
PRISCILA ESTEFANIA
VALVERDE ARMAS

Priscila Valverde Armas, PhD.

Tutor de proyecto

Resumen

El río Santa Rosa es la principal fuente de abastecimiento de agua para el cantón Santa Rosa. Sin embargo, la calidad del agua ha sido afectada por la presencia de elementos potencialmente tóxicos (EPT), principalmente el As. El objetivo del proyecto es diseñar un sistema avanzado de tratamiento de agua mediante electrodiálisis (ED) para la remoción de As en el agua de captación. Para este propósito, se recolectaron muestras de agua de la quebrada El Pantéon (afluente del río Santa Rosa) y se midieron parámetros fisicoquímicos in situ. En laboratorio se evaluaron tres alternativas de remoción de As, desde tecnologías convencionales hasta tratamientos avanzados como, ósmosis inversa y ED. Para cada alternativa se evaluó la viabilidad según parámetros técnicos, económicos, sociales y ambientales. La ED se destacó por su alta eficiencia de remoción de As y su bajo consumo energético. Como resultado se identificó que el consumo energético es proporcional al aumento del caudal y que el porcentaje de remoción de As es proporcional al incremento del voltaje. El diseño optimizado del sistema de ED incluyó un voltaje de 6 V; caudal de 500 mL/min; volumen de 5000 mL y un porcentaje de recuperación teórico del 80%, logrando una remoción de As del 73%, energía específica de 0.059 kWh/m³ y un costo energético de \$0.0006 por m³ de agua tratada. Estos hallazgos son prometedores en cuanto a la capacidad de escalabilidad y adaptabilidad del tratamiento de ED para remoción de contaminantes en comunidades de zonas rurales con limitados recursos económicos.

Palabras Clave: electrodiálisis, elementos potencialmente tóxicos, arsénico, porcentaje de remoción.

Abstract

The Santa Rosa River is the main water supply source for the Santa Rosa canton. However, the water quality has been affected by the presence of potentially toxic elements (PTE), primarily arsenic (As). The project aims to design an advanced water treatment system using electrodialysis (ED) for the removal of As from the source water. Field samples were collected from El Pantéon stream (a tributary of the Santa Rosa River), and in situ physicochemical parameters were measured. In the laboratory, three alternatives for contaminant removal were evaluated, ranging from conventional technologies to advanced treatments such as reverse osmosis and ED, considering technical, economic, social, and environmental parameters. ED stood out for its high As removal efficiency and low energy consumption. The results indicated that energy consumption is proportional to the increase in flow rate, and similarly, the percentage of As removal is proportional to the voltage increase. The optimized ED system design included a voltage of 6 V, flow rate of 500 mL/min, volume of 5000 mL, and a theoretical recovery percentage of 80%, achieving a 73% As removal, specific energy consumption of 0.059 kWh/m³, and an energy cost of \$0.0006 per m³ of treated water. These findings are promising in terms of scalability and adaptability for rural communities.

Keywords: electrodialysis, potentially toxic elements, arsenic, removal percentage

Índice general

Resumen	VI
Abstract.....	VII
Índice general	VIII
Abreviaturas.....	XV
Simbología.....	XVII
Índice de figuras.....	XVIII
Índice de tablas.....	XXI
Índice de planos.....	XXIII
Capítulo 1	1
1. Introducción.....	2
1.1. Antecedentes.....	2
1.2. Presentación general del problema.....	3
1.3. Justificación del problema.....	4
1.4. Objetivos.....	6
1.4.1. Objetivo General.	6
1.4.2. Objetivos Específicos.	6
Capítulo 2	7
2. Materiales y métodos	8
2.1. Revisión de literatura	8
2.1.1. Arsénico en el agua.....	8
2.1.2. Métodos de remoción de arsénico del agua.	8

2.1.3.	Técnicas convencionales.	9
2.1.4.	Ósmosis Inversa.....	10
2.1.5.	Electrodiálisis.	11
2.2.	Área de estudio.....	13
2.2.1.	Ubicación.	13
2.2.2.	Recursos hídricos.....	14
2.2.3.	Planta de tratamiento de agua (PTAP).....	15
2.2.4.	Clima.....	16
2.2.5.	Geología.	17
2.2.6.	Concesiones mineras.....	18
2.3.	Trabajo de campo.....	19
2.3.1.	Recolección de muestra.	19
2.3.2.	Medición de parámetros fisicoquímicos in-situ.	20
2.3.3.	Test semi-cuantitativo de As.	21
2.4.	Trabajo en laboratorio.....	22
2.4.1.	Análisis de iones mayoritarios.	22
2.4.1.1.	Titulación volumétrica.	22
2.4.1.2.	Espectrofotometría de luz visible.	24
2.4.1.3.	Potencionmetría.....	25
2.4.2.	Análisis cuantitativo de As.....	25
2.4.3.	Experimentación.....	25
2.4.3.1.	Sistemas de electrodiálisis y membranas.....	25
2.4.3.2.	Registro fotográfico.....	26

2.4.3.3. Procedimiento experimental.....	27
2.4.3.3.1. Caudal	28
2.4.3.3.2. Voltaje.....	28
2.4.3.3.3. Volumen.....	28
2.4.3.4. Plan de trabajo.....	30
2.5. Análisis de datos.....	32
2.5.1. Balance iónico.....	32
2.5.2. Caracterización del agua.....	32
2.6. Análisis de alternativas	32
2.6.1. Criterios de evaluación de las alternativas.....	33
2.6.2. Técnicas convencionales	34
2.6.2.1. Técnico.	35
2.6.2.2. Económico.	35
2.6.2.3. Social.....	36
2.6.2.4. Ambiental.....	37
2.6.3. Alternativa 2: Osmosis Inversa.....	39
2.6.3.1. Técnico.....	39
2.6.3.2. Económico.....	40
2.6.3.3. Ambiental.....	40
2.6.3.4. Social.....	40
2.6.4. Alternativa 3: Electrodiálisis.....	41
2.6.4.1. Técnico.	41
2.6.4.2. Económico.	48

2.6.4.3. Ambiental.....	49
2.6.4.4. Social.....	51
2.6.5. Selección de alternativa óptima.....	53
Capítulo 3	55
3. Diseños y especificaciones.....	56
3.1. Diseños	56
3.1.1. Población futura.	56
3.1.2. Población de diseño.	57
3.1.3. Dotación de diseño.....	57
3.1.4. Variaciones de consumo.	58
3.1.4.1. Caudal medio.....	58
3.1.4.2. Caudal máximo diario.	59
3.1.4.3. Caudal máximo horario.	59
3.1.5. Resultados de medición de parámetros in-situ.	60
3.1.5.1. Concentración semi-cuantitativa de As.	60
3.1.5.2. Parámetros físico-químicos.....	60
3.1.6. Medición de parámetros en laboratorio.	61
3.1.6.1. Caracterización hidro química.....	61
3.1.6.2. Resultados de concentraciones de elementos potencialmente tóxicos.63	
3.1.7. Diseño del sistema de electrodiálisis (ED) para remover As del agua.	64
3.1.7.1.1. Efecto de variación del caudal en el consumo energético	65
3.1.7.1.2. Efecto del voltaje en la remoción de As en el agua tratada.	68

3.1.7.1.3.	Efecto del voltaje en la concentración de As en el agua de rechazo	69
3.1.7.1.4.	Escalabilidad del volumen en el sistema de ED	71
3.1.7.1.5.	Eficiencia de remoción de elementos potencialmente tóxicos.	73
3.1.7.1.6.	Remoción de elementos potencialmente tóxicos (ETP).....	74
3.1.7.1.7.	Desafíos experimentales por turbidez	76
3.1.8.	Diseño de sistemas de pretratamiento y postratamiento.	80
3.1.8.1.	Sistema de pretratamiento.	80
3.1.8.1.1.	Dimensionamiento de filtro lento de arena	81
3.1.8.1.2.	Dimensionamiento de un tanque de regulación.....	85
3.1.8.2.	Sistema de postratamiento.....	88
3.1.8.2.1.	Dimensionamiento de piscina de postratamiento	89
3.2	Especificaciones técnicas	91
Capítulo 4	92
4.	Estudio del impacto ambiental.....	93
4.1.	Descripción del proyecto.....	93
4.2.	Línea base ambiental	94
4.2.1.	Clima.....	94
4.2.2.	Calidad del agua.	95
4.2.3.	Efectos del cambio climático.	95
4.2.4.	Uso y cobertura de suelo.....	96
4.2.5.	Fauna.....	97
4.2.6.	Zonas bajo conservación ambiental.	97

4.3.	Actividades del proyecto	98
4.3.1.	Construcción.	99
4.3.2.	Operación-Mantenimiento.	99
4.3.3.	Cierre.	99
4.4.	Identificación de impactos ambientales.....	101
4.4.1.	Regularización ambiental nacional.	101
4.4.2.	Categorización Ambiental Nacional.	102
4.4.3.	Registro de proyecto en SUIA.	103
4.5.	Valoración de impactos ambientales.....	103
4.5.1.	Lista de control.....	103
4.5.2.	Matriz Leopold.....	105
4.5.2.1.	Nivel de magnitud de impactos ambientales.	106
4.5.2.2.	Nivel de importancia de impactos ambientales.....	110
4.6.	Valor de índice de impacto ambiental	113
4.7.	Medidas de prevención/mitigación	116
Capítulo 5	120
5.	Presupuesto	121
5.1.	Estructura Desglosada de Trabajo.....	121
5.2.	Rubros y análisis de precios unitarios.....	123
5.3.	Descripción de cantidades de obra	125
5.4.	Valoración integral del costo del proyecto.....	125
5.5.	Cronograma de obra.....	127
6.	Conclusiones y recomendaciones	131

6.1. Conclusiones	131
6.2. Recomendaciones	133
Referencias.....	134
Apéndices	141

Abreviaturas

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
IARC	Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer
INEN	Instituto Ecuatoriano de Normalización
OMS	Organización Mundial de la Salud
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
EPA	Agencia Estadounidense de Protección Ambiental
INEC	Instituto Nacional de Estadística y Censos
SIN	Sistema Nacional de Información
GAD	Gobierno Autónomo Descentralizado
PTAP	Planta de tratamiento de agua potable
ARCA	Agencia de Regulación y Control del Agua
ARCOM	Agencia de Regulación y Control Minero
FCSH	Facultad de Ciencias Sociales y Humanísticas
CEPIS	Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente
EIA	Evaluación de impacto ambiental
ACV	Análisis de ciclo de vida
SUIA	Sistema de información ambiental
MAE	Ministerio del Ambiente
ZRA	Zonas de recarga de agua
SNAP	Sistema Nacional de Áreas Protegidas
CCAN	Catálogo de Caracterización Ambiental Nacional
MAATE	Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica
EPT	Elementos potencialmente tóxicos
UF	Ultrafiltración
NF	Nanofiltración
OI	Ósmosis Inversa

AEM	Membrana de intercambio aniónico
CEM	Membrana de intercambio catiónico
EDTA	Etilendiaminotetraacético
CC	Corriente continua
CA	Corriente alterna
IA	Impacto Ambiental
ED	Electrodialisis
EMAPASR-EP	Empresa de Agua Potable y Alcantarillado de Santa Rosa

Simbología

As	Arsénico
As ⁵⁺	Arseniato
As ³⁺	Arsenito
CE	Conductividad eléctrica
SDT	Sólidos totales disueltos
ph	Potencial de hidrógeno
Ca	Calcio
Co	Cobalto
Cu	Cobre
Cr	Cromo
Fe	Hierro
Mg	Magnesio
Mn	Manganeso
Ni	Niquel
Pb	Plomo
K	Potasio
Na	Sodio
CN	Cianuro
cm	Centímetro
mg	Miligramo
L	Litro
A	Amperios
V	Voltios
kWh	Kilowatts
HCO ₃ ⁻	Bicarbonatos
H ₂ SO ₄	Ácido Sulfúrico

Índice de figuras

Figura 1.1 Objetivos de desarrollo sostenible.....	5
Figura 2.1 Esquema sobre el principio de la electrodiálisis	13
Figura 2.2 Mapa de ubicación del área de estudio. Cantón Santa Rosa, provincia de El Oro, Ecuador	14
Figura 2.3 Recursos hídricos. Cantón Santa Rosa, Provincia El Oro, Ecuador	15
Figura 2.4 Planta de Tratamiento Los Jardines del cantón Santa Rosa	15
Figura 2.5 Cobertura de agua de la PTAP Los Jardines por parroquia en el cantón Santa Rosa	16
Figura 2.6 Mapa de formaciones geológicas en el cantón Santa Rosa	18
Figura 2.7 Número de concesiones mineras en el cantón Santa Rosa	19
Figura 2.8 Mapa ubicación de la cabecera cantonal Santa Rosa	20
Figura 2.9 Medición de parámetros fisicoquímicos in-situ	21
Figura 2.10 Test semi-cuantitativo de As de HACH	22
Figura 2.11 Análisis de iones mediante titulación volumétrica.....	23
Figura 2.12 Análisis de iones mayoritarios mediante espectrofotometría de luz visible	24
Figura 2.13 Esquema del sistema de tratamiento de ED.....	26
Figura 2.14 Registro fotográfico de la tira reactiva de la prueba de As de HACH.....	27
Figura 2.15 a) Resultados de la concentración de As de las pruebas semi-cuantitativas de la remoción de As en función del tiempo. b) Registro fotográfico de las pruebas semi-cuantitativas	43
Figura 2.16 a) Resultados de la concentración de As de las pruebas semi-cuantitativas de la remoción de As en función del tiempo. b) Registro fotográfico de las pruebas semi-cuantitativas en función del tiempo	45
Figura 2.17 a) Resultados de la concentración de As de las pruebas semi-cuantitativas de la remoción de As en función del tiempo. b) Registro fotográfico de las pruebas semi-cuantitativas en función del tiempo	47

Figura 2.18 Variación de SDT en relación con el tiempo.....	50
Figura 2.19 Esquema radial de la ponderación de las diferentes tecnologías para remoción de As	53
Figura 3.1 Crecimiento poblacional del cantón Santa Rosa	57
Figura 3.2 Variaciones de consumo para el diseño del sistema de ED para la remoción de As en el cantón Santa Rosa.....	60
Figura 3.3 Diagrama de Stiff de la muestra de agua tomada de la quebrada el Panteón, Santa Rosa	63
Figura 3.4 Influencia de variación del caudal en la intensidad de corriente durante la experimentación.....	65
Figura 3.5 Resultados de la variación de voltaje y volumen en el agua tratada.....	69
Figura 3.6 Resultados de la variación de voltaje y volumen en el agua de rechazo	70
Figura 3.7 Efecto de variación del volumen en la intensidad de corriente durante la experimentación.....	71
Figura 3.8 Efecto de variación de volumen y voltaje sobre la eficiencia del sistema de ED en la remoción del Mn.....	73
Figura 3.9 Remoción de EPT encontrados en el agua muestreada en la quebrada El Panteón. Efecto de la variación del voltaje y volumen.....	75
Figura 3.10 Eficiencia de remoción del sistema de ED bajo diferentes niveles de turbidez .	78
Figura 3.11 Sistema de pretratamiento para disminuir la turbidez del agua	83
Figura 3.12 Sistema de ingreso y salida al filtro lento de arena.....	84
Figura 3.13 Sistema de desagüe	84
Figura 3.14 Tanque de regulación para agua potable	87
Figura 3.15 Interior del tanque de regulación	88
Figura 3.16 Piscina de postratamiento para agua concentrada de As.....	90
Figura 3.17 Interior de la piscina de postratamiento para agua concentrada de As.....	90
Figura 4.1 Mapa de Isotermas del cantón Santa Rosa.....	94
Figura 4.2 Mapa de uso y cobertura de suelo del cantón Santa Rosa.....	96

Figura 4.3 Mapa de áreas protegidas del cantón Santa Rosa	98
Figura 4.4 Categorización de las actividades que se llevan a cabo en el presente proyecto según el CCAN.	102
Figura 5.1 Estructura desglosada de trabajo para el diseño del sistema de ED para la remoción de As presente en el agua.....	122
Figura 5.2 Cronograma de obra - Página 1	128
Figura 5.3 Cronograma de obra - Página 2	129

Índice de tablas

Tabla 2.1 Condiciones experimentales de los ensayos llevados a cabo con el stack de ED29	
Tabla 2.2 Duración de actividades a realizar para el desarrollo del proyecto	31
Tabla 2.3 Criterios y factores de evaluación para la selección de alternativa óptima de tratamiento de agua con concentraciones de As.....	34
Tabla 2.4 Cantidad de lodos generados luego del proceso de adición del coagulante	38
Tabla 2.5 Puntaje asignado para cada criterio de evaluación para la tecnología convencional	39
Tabla 2.6 Puntaje asignado para cada criterio de evaluación para la tecnología de OI	41
Tabla 2.7 Registro fotográfico de la concentración de As en el agua de rechazo.....	51
Tabla 2.8 Puntaje asignado para cada criterio de evaluación para la tecnología de ED.....	52
Tabla 2.9 Comparación de las distintas alternativas de tecnologías para la remoción de As del agua.....	54
Tabla 3.1 Métodos para establecer la población futura	56
Tabla 3.2 Dotación media futura para poblaciones mayores a 1000 habitantes.....	58
Tabla 3.3 Parámetros fisicoquímicos medidos in situ en la quebrada El Panteón, Santa Rosa	61
Tabla 3.4 Resultado de análisis de iones mayoritarios de la muestra de agua de la quebrada El Panteón, Santa Rosa.....	62
Tabla 3.5 Resultados de la concentración de EPT presentes en el agua de la quebrada El Panteón en diferentes campañas de muestreo.	64
Tabla 3.6 Efecto de la variación de caudal en parámetros de diseño.....	67
Tabla 3.7 Efecto de la variación de volumen en parámetros de diseño.....	73
Tabla 3.8 Concentración inicial de EPT encontrados en la muestra de agua de la quebrada El Panteón. LMP establecido por la normativa	74
Tabla 3.9 Estado de membranas de intercambio iónico usadas en el sistema de ED	79
Tabla 3.10 Característica del lecho filtrante (arena)	81

Tabla 3.11 Dimensiones del tanque de regulación.....	87
Tabla 3.12 Actividades y componentes base para el desarrollo de la implementación de un sistema de tratamiento avanzado de agua para la remoción de As del agua	91
Tabla 4.1 Descripción de las actividades a desarrollarse en cada etapa del proyecto.....	100
Tabla 4.2 Nivel de impacto según la categoría presentada por CCAN	102
Tabla 4.3 Lista de control para un sistema avanzado de ED para remoción de As	104
Tabla 4.4 Escala de valoración cuantitativa para evaluar la magnitud de los impactos ambientales en una matriz Leopold.....	106
Tabla 4.5 Magnitud de impactos ambientales en la matriz de Leopold.....	109
Tabla 4.6 Ponderaciones para los criterios de evaluación del nivel de importancia según la matriz Leopold.	110
Tabla 4.7 Magnitud de impactos ambientales en la matriz de Leopold.....	112
Tabla 4.8 Escala de valoración cualitativa para la matriz de Leopold.....	113
Tabla 4.9 Valoración cualitativa del impacto ambiental en matriz de Leopold	115
Tabla 4.10 Estrategias de mitigación adoptadas para prevenir impactos ambientales negativos	117
Tabla 5.1 Análisis de precios unitarios - Sistema avanzado de electrodiálisis para remoción de As en el agua.....	124
Tabla 5.2 Presupuesto referencial de la implementación del sistema avanzado de ED para remoción de As del agua	126

Índice de planos

PLANO 1 Sistema de pretratamiento. Filtro lento de flujo descendente.	175
PLANO 2 Sistema de almacenamiento de agua tratada. Tanque de regulación.	176
PLANO 3 Sistema de postratamiento. Piscina de almacenamiento de agua de rechazo. .	177

Capítulo 1

1. Introducción

1.1. Antecedentes

El avance tecnológico e industrial ha contribuido considerablemente en el desarrollo del bienestar humano. No obstante, este desarrollo ha desencadenado consecuencias perjudiciales para el entorno, incluyendo el agotamiento de recursos, el calentamiento global y la destrucción de ecosistemas (Sedighi et al., 2023). Para aseguramiento el desarrollo sostenible de las futuras generaciones es necesario abordar los problemas ambientales, de recursos y energía (Liu & Cheng, 2020).

En cuanto a recursos, es fundamental proteger los recursos hídricos, gestionar su uso de forma eficiente y controlada. El agua, siendo una fuente vital para la vida, cumple con diversas funciones esenciales en el desarrollo y la supervivencia de la humanidad (Jamaly et al., 2014). La búsqueda de nuevas fuentes de agua se ha convertido en un desafío cada vez más difícil debido al deterioro de la calidad de los recursos hídricos. La presencia de elementos contaminantes en el agua representa un riesgo para la salud de los consumidores (Dilaver et al., 2022). Entre los diferentes contaminantes que se presentan se encuentran los elementos potencialmente tóxicos (EPT). Algunos EPT se caracterizan por tener una baja capacidad de degradación en el medio ambiente, y una vez que ingresan a los organismos vivos, tienden a acumularse en los tejidos (Mazumder & Dasgupta, 2011).

Se ha detectado la presencia de estos contaminantes en altas concentraciones en diferentes entornos ambientales como en suelo y agua. Entre los contaminantes que causa preocupación a la comunidad científica, debido a su impacto negativo a la salud humana y al medio ambiente, es el arsénico (As), ya que es cancerígeno y altamente tóxico (Pál et al., 2022; Shahid, 2021). Esta problemática se agrava a un ritmo acelerado debido a que la liberación del As se puede dar, tanto por fuentes naturales como antropogénicas (Ortega et al., 2017).

En Ecuador, en zonas con actividad minera intensa se han reportado niveles de As que superan los límites máximos permitidos en la normativa. Una región afectada por esta

problemática es la cuenca alta del río Santa Rosa, en la provincia de El Oro, en donde se han reportado concentraciones de As entre 388 y 1633 $\mu\text{g/L}$ en el año 2021 (Jiménez-Oyola et al., 2023). Con el aumento de la conciencia acerca de los efectos de los EPT, ha surgido una mayor urgencia en la implementación de normativas cuya finalidad sea la de evitar la contaminación de los recursos hídricos, así como el desarrollo de nuevas tecnologías para la eliminación de As en el agua de consumo para garantizar la salud de los consumidores (Choong et al., 2007; Tee et al., 2016)

1.2. Presentación general del problema

La contaminación de los lagos y ríos por EPT es un problema grave a nivel mundial debido a su potencial tóxico. Estudios indican que alrededor del 40% de los cuerpos de agua en todo el mundo están contaminados por la presencia de EPT (Zhou et al., 2020). Los EPT son contaminantes altamente tóxicos que pueden causar efectos nocivos en los organismos vivos. Estos contaminantes pueden provocar trastornos de salud en diferentes partes del cuerpo humano, como el cerebro, los riñones, el hígado y el sistema inmunológico (Selatile et al., 2018). El As ha sido clasificado como un carcinógeno humano de Grupo I por la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC). Esta clasificación se basa en la existencia de pruebas suficientes que demuestran la capacidad del As para causar cáncer en los seres humanos (Pezeshki et al., 2023).

La presencia de EPT es uno de los principales factores que deteriora la calidad del agua de consumo (Agbasi et al., 2023). El agua potable suministrada en Santa Rosa supera los niveles recomendados de As, establecidos en 10 $\mu\text{g/L}$ por el Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN 1108) y la Organización Mundial de la Salud (OMS), lo que plantea un riesgo para la salud de la población local (Celi et al., 2020).

A pesar de la existencia de una planta de tratamiento convencional en Santa Rosa, los métodos tradicionales utilizados, como la sedimentación y la filtración, no cuentan con la capacidad técnica necesaria para eliminar el As del agua de manera eficaz y económicamente viable (GAD Santa Rosa, 2021). Por lo tanto, es crucial explorar

tecnologías avanzadas de tratamiento de agua que sean adecuadas para comunidades con recursos limitados. La electrodiálisis (ED) se presenta como una solución prometedora para la eliminación del As en el agua. No obstante, se requiere el diseño de un sistema de electrodiálisis escalable para futuras pruebas piloto.

1.3. Justificación del problema

Encontrar soluciones efectivas, sostenibles y económicamente viables para abordar el problema de la contaminación del agua por As es de interés de mundial. Enfermedades transmitidas por el agua son el resultado de prácticas deficientes de saneamiento e higiene. Según la OMS, la exposición a largo plazo al As en el agua puede causar cáncer de piel, pulmón, vejiga y riñón, así como enfermedades cardiovasculares y diabetes (Adelodun et al., 2021).

En vista del creciente desafío, naciones desarrolladas han logrado avances en el tratamiento y purificación de fuentes de agua contaminadas, por medio de tecnologías avanzadas (Adelodun et al., 2021). La ED es una técnica que ha demostrado ser eficiente en la eliminación de As del agua, con una alta selectividad y baja producción de residuos. Además, la ED puede ser escalable y adaptable a diferentes tamaños de tratamiento, desde sistemas pequeños para uso doméstico hasta plantas de tratamiento a gran escala para comunidades o industrias. La ED puede requiere menos energía en comparación con otras tecnologías más comunes para eliminación de As del agua. Eso la convierte en una opción más sostenible desde el punto de vista energético, lo que es importante en un contexto de creciente preocupación por el cambio climático y la necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (McGovern et al., 2014).

No obstante, esto es una realidad diferente para países en desarrollo, donde se carece de recursos para mantener e implementar tecnologías avanzadas de tratamiento de agua. Por lo que es importante desarrollar y aplicar tecnologías como la ED en comunidades de países en vías de desarrollo, y que se preste especial atención a la

adaptabilidad y escalabilidad de estas tecnologías para diferentes contextos y necesidades (Adelodun et al., 2021).

Al mejorar la calidad del agua y garantizar el acceso a agua potable segura y limpia, se puede contribuir a la creación de comunidades más sostenibles y resilientes, lo que se alinea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), Objetivo 3 Salud y Bienestar, Objetivo 6 Agua limpia y saneamiento y Objetivo 11 Ciudades y comunidades sostenibles (Figura 1.1) (Nations, 2015). El cumplimiento de estos objetivos es esencial para mejorar la salud de las comunidades, estimular el desarrollo económico y prevenir conflictos por el acceso limitado de agua limpia. No alcanzar estos ODS podría dar lugar a consecuencias sociales, económicas y de salud, especialmente para las poblaciones más vulnerables.

Figura 1.1

Objetivos de desarrollo sostenible



Nota. Objetivos de desarrollo sostenible que son aplicados en el proyecto. Unesco (2021).

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General.

Diseñar el sistema de tratamiento de agua avanzado en Santa Rosa, Ecuador mediante la utilización de electrodiálisis en el proceso de tratamiento para la remoción de arsénico del agua de captación.

1. ¿Cuáles son los resultados del análisis de campo y laboratorio y la concentración de As en el agua de captación de la Planta de Tratamiento Los Jardines?
2. ¿Cuáles son las variables de diseño de experimentación que permitirán asegurar un diseño adecuado que maximice la remoción del As del agua?
3. ¿Cuál es el nivel de optimización que se espera lograr en el desarrollo del sistema avanzado de tratamiento de agua?

1.4.2. Objetivos Específicos.

1. Caracterizar el agua de captación de la Planta de Tratamiento Los Jardines mediante el análisis de campo y laboratorio de los parámetros fisicoquímicos y la determinación de la concentración de As en el agua.
2. Evaluar parámetros de diseño del sistema de tratamiento, como caudal, volumen, voltaje y recuperación, mediante experimentación en laboratorio para la determinación de las condiciones de diseño idóneas que garanticen una mayor remoción de As del agua.
3. Optimizar el sistema de tratamiento de electrodiálisis mediante el análisis de diversas variables que minimicen el consumo energético y que maximicen la remoción de As del agua, cumpliendo con los criterios económicos, ambientales y sociales según la normativa.

Capítulo 2

2. Materiales y métodos

2.1. Revisión de literatura

2.1.1. Arsénico en el agua.

El As es un metaloide altamente tóxico presente en la naturaleza, puede encontrarse en formas orgánicas e inorgánicas, siendo la forma inorgánica la más peligrosa en términos de salud. El As se encuentra en diferentes estados de oxidación en la naturaleza, principalmente como arseniato (As^{5+}) y arsenito (As^{3+}), estas formas predominan en aguas subterráneas y aguas superficiales, debido a la lixiviación de minerales de As en el suelo y la roca circundante (Fazal et al., 2001; Nazari & Abbasnejad, 2015). El As puede causar diversos impactos negativos en la salud humana. El consumo a largo plazo puede provocar problemas de piel, anomalías en el embarazo, diabetes, varios tipos de cáncer, como pulmonar, hepático, renal y vejiga (Nasab et al., 2022; Pezeshki et al., 2023).

Debido a los riesgos para la salud, la OMS y la Agencia Estadounidense de Protección Ambiental (EPA) han establecido como el límite máximo permisivo en el agua potable de 10 $\mu\text{g/L}$. No obstante, más de 200 millones de personas están expuestas a agua con niveles de As por encima del límite establecido, y más de 105 países han informado la presencia de As en el agua potable. Ecuador se ha visto afectado por esta problemática al encontrarse concentraciones de As en el agua de consumo humano que superan el límite establecido por la normativa ecuatoriana (Ahmed et al., 2022).

2.1.2. Métodos de remoción de arsénico del agua.

Existen diferentes tipos de procedimientos físicos-químicos para remover As del agua. Entre las técnicas se incluyen procesos convencionales como la coagulación-floculación y precipitación química. También se han desarrollado tecnologías avanzadas mediante el uso de membranas como la ultrafiltración (UF), nanofiltración (NF), osmosis inversa (OI) y electrodiálisis (Abejón et al., 2015).

2.1.3. Técnicas convencionales.

La eliminación de As del agua mediante coagulación-floculación es un método que utiliza sales de hierro y aluminio como coagulantes. Se ha demostrado que el As (V) se elimina de manera más efectiva que el As (III), lo que sugiere un paso de oxidación para eliminar mejor el As (III). Sin embargo, la eliminación de As por coagulación-floculación se ve afectada por varios factores, como la dosis del coagulante, el pH, la presencia de materia orgánica y la especiación del As, lo que afecta en la eficiencia de esta técnica (Pallier et al., 2010)

La precipitación química es un método utilizado debido a su simplicidad en el control del proceso, su eficacia en un rango amplio de temperaturas y su bajo costo operativo. Este método implica ajustar las condiciones para convertir los iones metálicos pesados en compuestos menos solubles, como hidróxidos, sulfuros o carbonatos, que luego pueden eliminarse mediante procesos físicos, como sedimentación, flotación o filtración. Estos procesos dependen de características como el tamaño, la densidad y la carga de partículas que se desean eliminar. (Chen et al., 2018).

La ecuación (2.1) muestra el mecanismo conceptual del proceso de eliminación



En la ecuación, M^{2+} y OH^{-} representan los metales disueltos y los hidroxilos respectivamente, mientras que $M(OH)_2$ es el hidróxido metálico insoluble que se forma durante el proceso de precipitación química. La cal u óxido de calcio (CaO) es el agente de precipitación más utilizado en procesos de tratamiento de agua para eliminar metales pesados, ya que son ampliamente disponibles y económicos en la mayoría de los países (Aziz et al., 2008).

Los procesos de coagulación-floculación y precipitación química se destacan por su simplicidad, bajo costo y seguridad en las operaciones. Sin embargo, la desventaja radica en el consumo significativo de productos químicos para reducir los metales a niveles adecuados para su liberación, lo que resulta en la generación de grandes cantidades de lodos que requieren tratamiento adicional, junto con otros problemas relacionados con la

precipitación y sedimentación de los metales y los efectos ambientales a largo plazo de la eliminación de lodos (Barakat, 2011).

2.1.4. Ósmosis Inversa.

La ósmosis inversa (OI), es una técnica que utiliza membranas semipermeables con un tamaño de poro pequeño ($0.0001 \mu\text{m}$). Funciona al invertir la dirección del flujo a través de la membrana, permitiendo que el agua pura pase del lado concentrado al diluido, evitando que los iones atraviesen la membrana. Estas membranas pueden filtrar una amplia gama de sustancias, incluyendo moléculas grandes, iones monovalentes y contaminantes extremadamente pequeños (Pezeshki et al., 2023).

El proceso de OI implica aplicar presión más allá de la presión osmótica del agua de alimentación. La eliminación de As en sus diferentes estados de oxidación, As^{3+} y As^{5+} , en la OI se debe a la capacidad de la membrana para retener partículas y iones de mayor tamaño. Tanto el arsenito (As^{3+}) como el arseniato (As^{5+}) tienen un tamaño y carga iónica que les impide moverse a través de la membrana semipermeable, lo que resulta en su retención y eliminación del agua (Qasim et al., 2019).

Las membranas de OI ofrecen ventajas como requerimientos de espacio reducidos, resistencia mecánica, estabilidad química y capacidad para soportar altas temperaturas (Selatile et al., 2018). Estas membranas no son porosas sino densas, lo que les permite eliminar partículas, iones y compuestos orgánicos. Normalmente, las membranas de OI pueden rechazar entre el 90% y 99% de los contaminantes en el agua de alimentación. (Malaeb & Ayoub, 2011).

La OI se ha destacado por su alta eficiencia en eliminación de contaminantes, sin embargo, su capacidad de recuperación se ve restringida por la presión máxima que la membrana puede soportar (Naderi Beni et al., 2024). Además, la implementación de una planta de OI implica una inversión significativa, la inversión se distribuye en el sistema de bombeo y las membranas, que esenciales para su funcionamiento y representarían un 40%

del costo total (Ospina & Pinilla, 2008) La aplicación de un sistema de OI en áreas rurales enfrenta desafíos adicionales, la falta de conexión a redes eléctricas continuas en zonas rurales limita la viabilidad de instalación de estas plantas, ya que la energía es esencial para el bombeo y otros procesos requeridos en la OI (Oh et al., 2000) Entre las limitaciones de esta tecnología está bloqueo de los canales a nano escala de la membrana o de la adsorción de impurezas en su superficie, lo que provoca una disminución en el rendimiento de la membrana. Este fenómeno causa una serie de problemas, como la reducción del flujo de agua, la pérdida de calidad del producto, una menor vida útil de las membranas y un mayor consumo de energía en el proceso (Flora, 1993).

2.1.5. Electrodialisis.

La ED es una tecnología de separación electromecánico que emplea membranas de intercambio iónico bajo la influencia de un campo eléctrico para separar especies iónicas eliminar dureza y compuestos orgánicos de los electrolitos. En la Figura 2.1 se muestra la unidad de ED, consta de dos compartimentos de electrodos en contacto con una serie de membranas de intercambio aniónico y catiónico (AEM, CEM) ubicadas entre los electrodos, creando alternancia entre los compartimentos de solución concentrada y diluida. Una fuente de energía carga los electrodos, lo que permite que una corriente eléctrica fluya a través de la pila de ED. Los aniones con carga eléctrica de la solución de alimentación migran hacia el ánodo (electrodo cargado positivamente), mientras que los cationes migran hacia el cátodo (el electrodo cargado negativamente) (Mohammadi et al., 2021).

En un proceso de ED, la movilidad de iones a través de las membranas depende de parámetros operativos como la concentración y el voltaje aplicado. Dada la influencia de estos parámetros en la transferencia de masa de ambos estados de oxidación de As a través de las membranas, se analiza por separado los diferentes aspectos operativos para As (III) y As (V) (Pham et al., 2021).

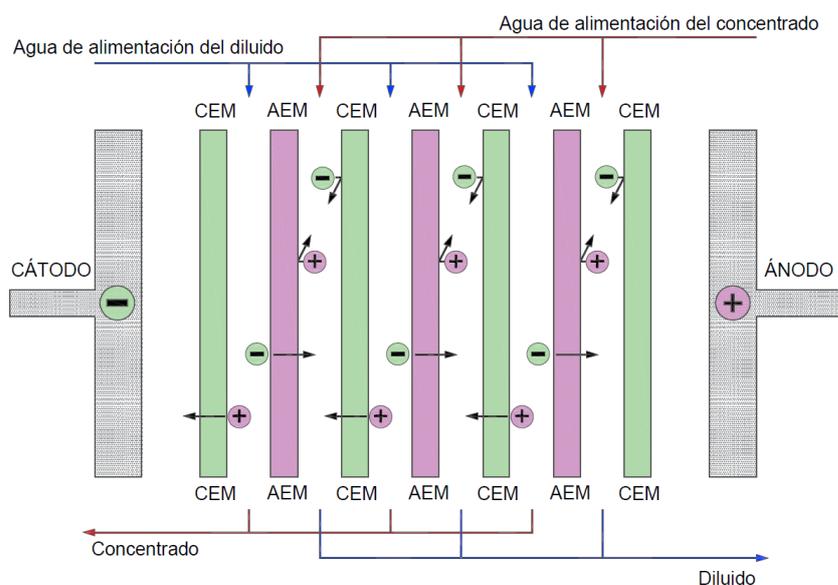
El voltaje aplicado tiene un efecto significativo en la cinética y la eficiencia de eliminación de As de la solución de alimentación. Tanto para As (III) como para As (V), la eliminación aumenta con el incremento del voltaje aplicado. Resultados indican que se puede eliminar de manera eficiente hasta un 91% de As (III) y un 98% de As (V) (Mendoza et al., 2014).

La carga más negativa de As (V) contribuye a su mayor tasa de eliminación en comparación con As (III). La eliminación de As (V) es más rápida que la de As (III), lo que sugiere una cinética de transferencia de masa superior para As (V). Además, los coeficientes de transferencia de masa de As (V) son más altos que los de As (III), lo que indica una mayor negatividad de carga y una mayor movilidad de iones de As (V) (Pham et al., 2021).

La ED ofrece un mejor control de contaminación en las membranas y es un sistema versátil para aplicar en espacios reducidos, ya que requiere de menor tamaño, y como resultado, implica un menor costo de capital. La economía en un proceso depende en gran medida de los costos operativos, que están influenciados por el consumo de energía y los costos de inversión. Estos costos son afectados por propiedades de la membrana, así como por parámetros de diseño del proceso, como velocidades de flujo, densidad de corriente, dimensiones de celda, energía requerida entre otros (Karimi et al., 2018). Un aspecto destacado de la ED es la robustez en relación con problemas de escala. Además, es adaptable y puede combinarse efectivamente con sistemas de energía renovable en áreas remotas que carecen de infraestructura adecuada (Patel et al., 2020).

Figura 2.1

Esquema sobre el principio de la electrodiálisis



Nota. Configuración del sistema de ED. La figura muestra el número y tipo de membranas utilizadas.

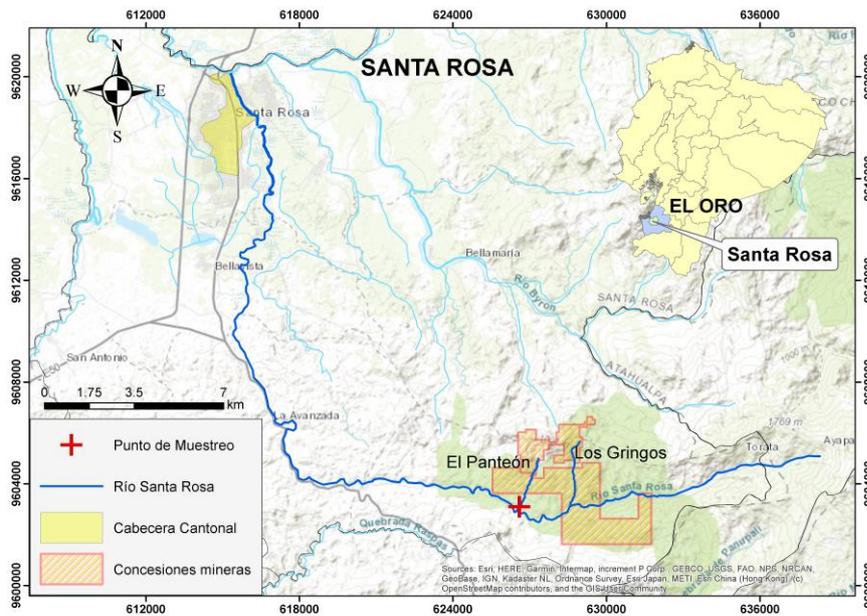
2.2. Área de estudio

2.2.1. Ubicación.

El área de estudio está ubicada en el cantón Santa Rosa, perteneciente a la provincia de El Oro, al sur de la región litoral del Ecuador. Cuenta con una superficie de 906.65 km² y una población aproximada de 85 000 habitantes (INEC, 2010). Limita al norte con el Océano Pacífico y los cantones Machala y Pasaje, al sur con los cantones Arenillas y Piñas, al este con el cantón Atahualpa y al oeste con el cantón Arenillas y el Océano Pacífico. (GAD Santa Rosa, 2019). En la Figura 2.2 se presenta la ubicación del cantón Santa Rosa información modificada del Sistema Nacional de Información (SNI).

Figura 2.2

Mapa de ubicación del área de estudio. Cantón Santa Rosa, provincia de El Oro, Ecuador



Nota. Modificado del Sistema de información geográfica (2015).

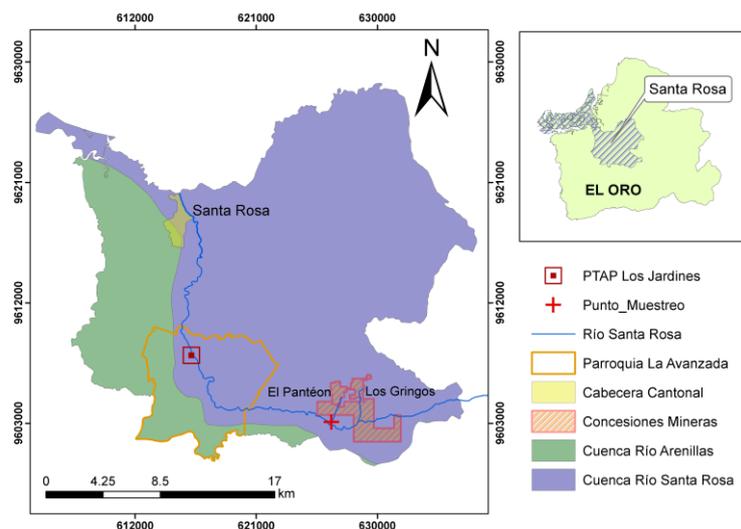
2.2.2. Recursos hídricos.

El cantón Santa Rosa cuenta con dos cuencas hidrográficas, la del río Santa Rosa y la del río Arenillas. La cuenca del río Santa Rosa es la más relevante en términos de extensión, ya que abarca aproximadamente el 76.63% del territorio del cantón, equivalente a 435.46 km² (GAD Santa Rosa, 2019).

El cantón dispone de dos fuentes hidrográficas importantes, el río Caluguro y el río Santa Rosa. En este último sus afluentes se originan en la Cordillera Dumarí, que es parte de la Cordillera de Los Andes. Las afluentes del río Santa Rosa son las quebradas El Panteón y Los Gringos, situadas dentro de concesiones mineras Figura 2.3 (GAD Santa Rosa, 2019).

Figura 2.3

Recursos hídricos. Cantón Santa Rosa, Provincia El Oro, Ecuador



Nota. Modificado del Sistema de información geográfica (2015).

2.2.3. Planta de tratamiento de agua (PTAP).

La Empresa de Agua Potable y Alcantarillado de Santa Rosa (EMAPASR-EP) (Figura 2.4) es la entidad responsable de proporcionar agua potable a 80% de la población del cantón. La PTAP Los Jardines se encuentra ubicada en la parroquia la Avanzada, cuenta con una capacidad de producir 540 L/s Utiliza un enfoque de tratamiento convencional que involucra procesos unitarios, incluyendo mezcla rápida, coagulación-floculación, sedimentación, filtración y desinfección. Tiene más de 20 años de vida útil y se necesitan planes de mantenimiento continuo para garantizar la calidad de agua potable y mantener su capacidad en procesamiento en niveles óptimos (GAD Santa Rosa, 2019).

Figura 2.4

Planta de Tratamiento Los Jardines del cantón Santa Rosa

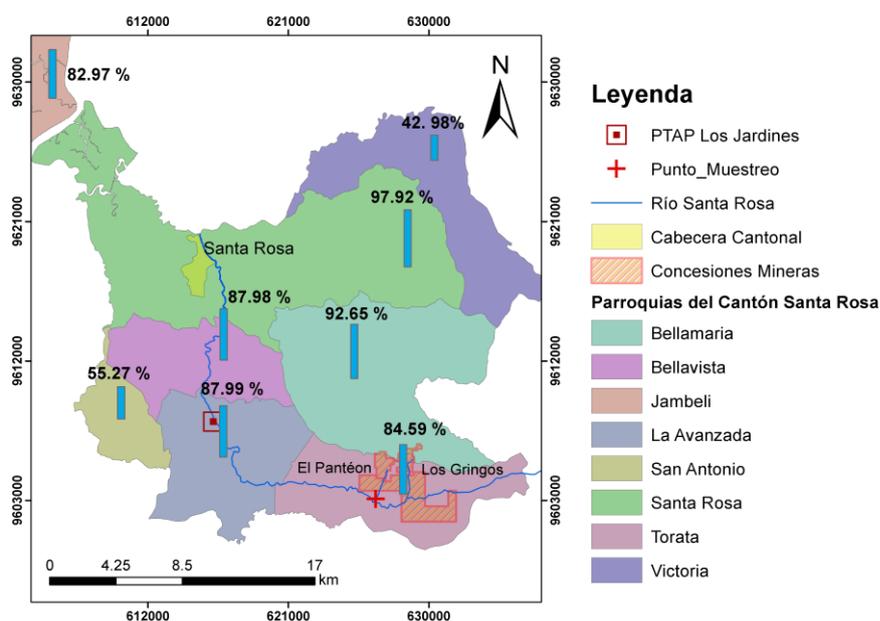


Nota. EMAPASR-EP (2020)

En la Figura 2.5 se indica la cobertura de la PTAP sobre las parroquias del cantón (GAD Santa Rosa, 2019). Siendo la cabecera cantonal Santa Rosa la que cuenta con el mayor abastecimiento de agua con un 97%, mientras que la parroquia Victoria es la que presenta el menor abastecimiento de agua con un 43%. El porcentaje restante que no está abastecido por la PTAP recibe agua de otras fuentes, como juntas de agua o sistemas externos (tanqueros). Las juntas de agua son definidas por el artículo 43 de la Ley de Recursos Hídricos como organizaciones comunitarias sin fines de lucro encargadas de prestar servicio público de agua potable (ARCA, 2014).

Figura 2.5

Cobertura de agua de la PTAP Los Jardines por parroquia en el cantón Santa Rosa



Nota. Modificado de EMAPASR-EP (2020)

2.2.4. Clima.

El 80% del cantón mantiene temperaturas que oscilan entre 24°C y 26°C, siendo más cálidas hacia el oeste y disminuyendo hacia las estribaciones de la cordillera, donde varían entre 22°C y 24°C. Santa Rosa presenta tres tipos de climas, ecuatorial mesotérmico semi húmedo, tropical mega térmico seco y tropical mega térmico semiárido. En cuanto a la precipitación, varía de 0 a 1250 mm anuales, siendo más abundante en la parte oriental

debido a las formaciones de lluvias orográficas relacionadas con la cordillera de los Andes, con fluctuaciones entre 750 y 1000 mm/año, y disminuye hacia el Océano Pacífico con fluctuaciones entre 500 y 750 mm/año, influenciado por la corriente marina fría de Humboldt.

2.2.5. Geología.

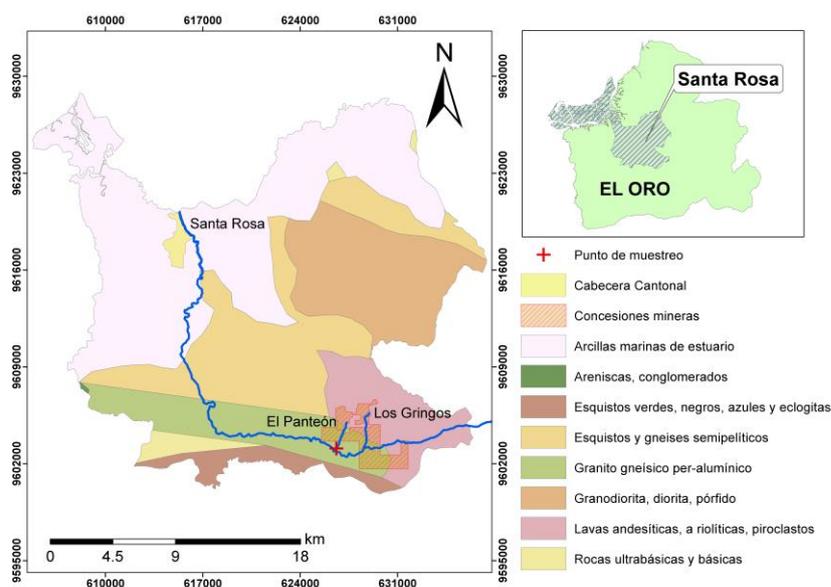
Las formaciones geológicas influyen en la calidad del agua de diversas maneras. Estas formaciones pueden contener minerales que se disuelven en el agua, aumentando la salinidad o liberando metales pesados que pueden contaminar el suministro de agua, lo que representa riesgos para la salud humana y para los ecosistemas acuáticos. El cantón presenta una variedad de formaciones geológicas, siendo las arcillas marinas de estuario las más predominantes. Estos suelos son fértiles y permiten la formación de vegetación ribereña y manglar en la zona occidental del cantón.

Los esquistos verdes, negros y azules son ricos en minerales de silicato y contienen cantidades significativas de sulfuros, que puedan liberar As al agua y al medio ambiente. La liberación de As se produce cuando los sulfuros se oxidan en presencia de agua y aire, lo que genera ácido sulfúrico y libera arsénico en forma soluble. Las eclogitas son rocas metamórficas de alta presión y temperatura que se forman a partir de la subducción de la corteza oceánica. Al igual que los esquistos, las eclogitas pueden contener sulfuros y otros minerales que liberan As al agua y al medio ambiente.

En la Figura 2.6 se observan las formaciones geológicas presentes en el cantón Santa Rosa, estudiadas por el Sistema Nacional de Información

Figura 2.6

Mapa de formaciones geológicas en el cantón Santa Rosa



Nota. Modificado del Sistema nacional de información geográfica (2015).

2.2.6. Concesiones mineras.

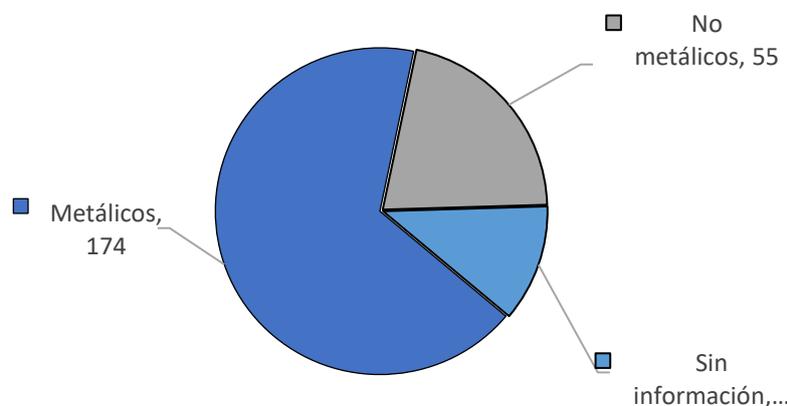
El cantón Santa Rosa posee extensos yacimientos de recursos minerales, principalmente en la cuenca alta del territorio. Esta zona concesionada para actividades mineras comprende aproximadamente el 32.46% del área total del cantón. El catastro minero actualizado en 2018 por la Agencia de Regulación y control Minero (ARCOM) identifica 259 concesiones mineras, de las cuales 6 están en fase de exploración, 12 en fase de exploración inicial, 84 en fase de exploración-explotación, 2 de libre aprovechamiento y 155 sin información detallada (Figura 2.7) (GAD Santa Rosa, 2019).

Las actividades mineras han tenido un impacto significativo en la calidad de agua en varios causes hídricos. Esto incluye la quebrada Las Plúas, río San Agustín, estero Birón Chico, Bijagual y río Bellamaría. Dando como resultado agua turbia, sedimentos y lodo, que afecta negativamente a la agricultura y el turismo en la zona. Además, se le suma la desviación de

los cauces naturales de los ríos y la alteración de su lecho debido a la maquinaria minera (GAD Santa Rosa, 2019).

Figura 2.7

Número de concesiones mineras en el cantón Santa Rosa



Nota. La figura muestra la cantidad de concesiones mineras del cantón Santa Rosa [ARCOM, 2018].

2.3. Trabajo de campo

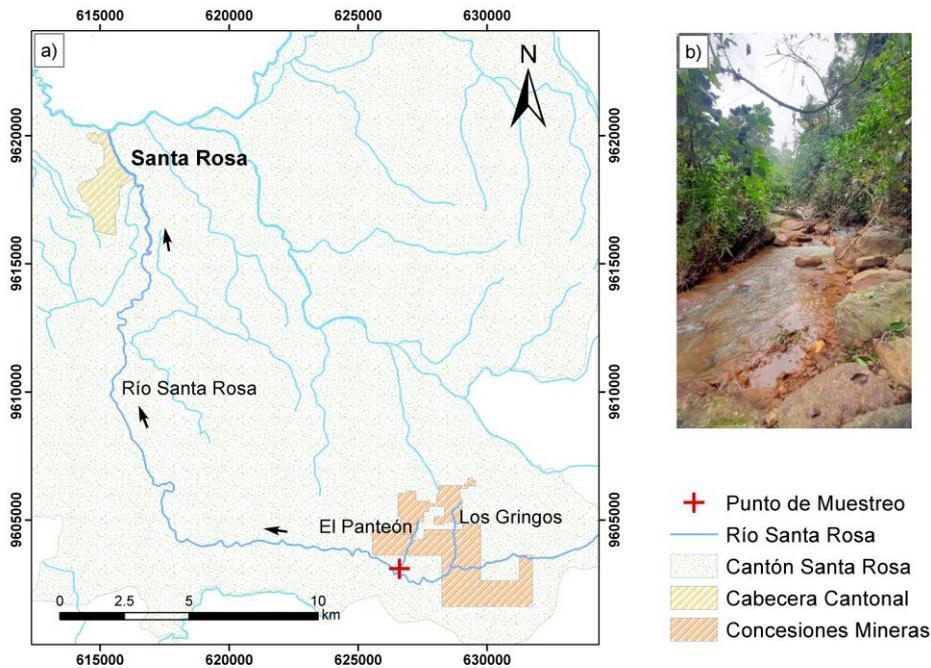
2.3.1. Recolección de muestra.

La recolección de la muestra de agua se llevó a cabo en la cuenca alta del río Santa, en la quebrada El Panteón como se muestra en la Figura 2.8. Las muestras se recopilaban en época de bajas precipitaciones pluviales, en el mes de agosto del año 2023.

El proceso de recolección de muestras siguió las directrices establecidas en la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 2169, la cual define los requisitos para el muestreo, transporte y preservación de las muestras. Para garantizar la integridad de las muestras, se emplearon envases de plástico adecuados para el envasado de las muestras. Durante el transporte, se mantuvo una temperatura constante de refrigeración entre 1 y 5 °C, dichas condiciones se mantuvieron en el laboratorio para preservar las muestras para su análisis. Para la conservación del As se acidificaron las muestras con ácido nítrico (HNO₃) hasta alcanzar un pH de 1 a 2.

Figura 2.8

Mapa ubicación de la cabecera cantonal Santa Rosa



Nota. Ubicación de punto de recolección de muestra de agua. b) Quebrada El Panteón. Modificado de SIN (2015).

2.3.2. Medición de parámetros fisicoquímicos in-situ.

Durante la recolección de la muestra de agua, se midieron los parámetros fisicoquímicos del agua obtenida de la quebrada El Panteón como se puede observar en la Figura 2.9. Se incluyó la medición del pH, la conductividad eléctrica (CE), los sólidos totales disueltos (SDT) y la temperatura, utilizando un dispositivo multiparamétrico HACH (HQ40d). Este dispositivo fue calibrado con los estándares de pH de 4.01, 7.00 y 10.01, mientras que para CE se utilizó el estándar de 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ de NaCl.

Figura 2.9

Medición de parámetros fisicoquímicos in-situ



Nota. Quebrada El Panteón en la muestra de agua recolectada

2.3.3. Test semi-cuantitativo de As.

En el proceso de recolección de la muestra de agua, se midió la concentración inicial de As en el agua, se realizó un test semi-cuantitativo de As con el método HACH (326.98.00005) como se observa en la Figura 2.10. Las tirillas reactivas muestran rangos de niveles de As en el agua entre 0 y 500 ppb. El procedimiento experimental se realizó posicionando la tira de ensayo con la almohadilla hacia abajo y centrada sobre el orificio de la tapa, asegurando el contacto con los gases generados; ya que las tiras reaccionan en presencia de los gases.

Luego, se añadieron 50 mL de la muestra de agua y se agregaron los reactivos necesarios indicados en el método. El tiempo de reacción para realizar la lectura fue de 30 a 35 min. El color de la tirilla fue comparado contra la escala de color del método semi-cuantitativo. Los resultados obtenidos de la concentración de As mediante este método son lecturas de rangos de este elemento.

Figura 2.10*Test semi-cuantitativo de As de HACH*

Nota. Comparación de la prueba semi-cuantitativa de As tomada in-situ con la gráfica del recipiente de la tira de control.

2.4. Trabajo en laboratorio

2.4.1. Análisis de iones mayoritarios.

En las instalaciones del Laboratorio de Sanitarias perteneciente a la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL). Se llevaron a cabo análisis de los iones mayoritarios, que abarcaron Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , NO_3^- y NO_2^- . Las concentraciones de Ca^{2+} y Mg^{2+} se determinaron mediante una valoración volumétrica con EDTA, mientras que para medir la concentración de HCO_3^- , se empleó una valoración con ácido sulfúrico. La evaluación del ion Na^+ se llevó a cabo a través de una sonda HACH, y para analizar los otros iones principales se utilizó la espectrometría de luz visible, empleando el equipo DR 3900 de HACH.

2.4.1.1. Titulación volumétrica.

El análisis de la concentración de calcio, magnesio y bicarbonatos se llevó a cabo mediante titulación volumétrica. Este procedimiento consistió en tomar una cantidad de la muestra y cocarla en un matraz Erlenmeyer. Luego, se procedió a titular la muestra con la solución estándar apropiada hasta que se produjo un cambio de color en la solución, indicando el punto final de la reacción. Se registraron los volúmenes inicial y final del titulante para calcular el volumen consumido, el cual se multiplicó por el factor de conversión

correspondiente. Para determinar la concentración de dureza cálcica, se empleó el método de titulación utilizando ácido etilendiaminotetraacético (EDTA) junto con el método HACH 8222, con un rango de medición de 0 a 25000 mg/L expresados en términos de CaCO_3 . Se tomó una alícuota de 50 mL de la muestra a la que se añadieron 1 mL de hidróxido de potasio y una pastilla del indicador CalVer 2. Para calcular la dureza cálcica en la muestra, se utilizó la ecuación 2.2, utilizando el volumen de titulante consumido y el factor de conversión correspondiente, ajustado según la cantidad de muestra empleada. Si no se realizó ninguna dilución y se utilizó una muestra de 50 mL, se utiliza la ecuación 2.2.

$$X \text{ ml (vol consumido } H_2SO_4) * 20 = 20x \frac{\text{mg}}{\text{L}} CaCO_3 \quad 2.3$$

La concentración de Mg (Mg^{2+}) se determinó a través de un cálculo por diferencia, el cual se efectuó tras a obtención de la dureza total mediante el método HACH 8226. Este procedimiento es similar al utilizado para la dureza cálcica con EDTA, con la distinción de que en este proceso se sustituyó el hidróxido de potasio por 1 mL de dureza de tampón y se incorporó una almohadilla de ManVer2. La Figura 2.11 ilustra el proceso de titulación empleado.

Figura 2.11

Análisis de iones mediante titulación volumétrica



Nota. Ensayo realizado en el Laboratorio de Sanitarias.

La medición de alcalinidad se efectuó mediante una titulación volumétrica el uso de ácido sulfúrico 0.02 N y los indicadores fenolftaleína y naranja de metilo. Para la calcular la concentración de alcalinidad total en la muestra, se aplicó la ecuación 2.4. Donde: Al representa alcalinidad, V_{con} es el volumen consumido y V_m el volumen de muestra.

$$Al_{HCO^{3-}} = \frac{V_{con} * 50000 * 0.02N}{V_m} \quad 2.4$$

2.4.1.2. Espectrofotometría de luz visible.

El análisis de Cl^- , SO_4^{2-} , K^+ , NO_3^- y NO_2^- se llevó a cabo utilizando un espectrofotómetro HACH DR 3900, junto con cubetas HACH2495402 de 10mL. Se tomaron alícuotas de 10 mL de las muestras en cubetas para realizar los análisis de los siguientes elementos mediante sus respectivos métodos: cloruros (utilizando el método HACH 8113) con la adición de 0.8 mL de tiocianato de mercurio y 0.4 mL de ion férrico.

Este proceso se repitió para los siguientes análisis, cada uno con su método correspondiente: sulfatos (HACH 8051), nitritos (HACH 8153), nitratos (HACH 8039), potasio (HACH 8049) y hierro (HACH 8008). En cada análisis, se emplearon los reactivos recomendados por los métodos respectivos y se verificó la medición utilizando estándares para cada analito (Figura 2.12).

Figura 2.12

Análisis de iones mayoritarios mediante espectrofotometría de luz visible



Nota. Ensayo realizado en el Laboratorio de Sanitarias

2.4.1.3. Potenciometría.

El ion Na^+ fue cuantificado a través de potenciometría, utilizando una sonda HACH y un medidor multiparamétrico HACH (HQ40d) según el método 8322. Para calibrar la sonda de sodio, se introdujeron 25 mL de una solución estándar de sodio en un vaso precipitado, y luego se añadió el contenido de una almohadilla de polvo ISA Sodio.

Luego, se insertó una barra magnética en la solución y se colocó el vaso precipitado sobre un plato agitador magnético. La sonda HAC se sumergió en la solución sin que entrara en contacto con la barra magnética, y se procedió a calibrar el medidor multiparamétrico. Para la medición de sodio en la muestra, se llevaron a cabo los mismos pasos descritos anteriormente, con la excepción de que se usaron 25 mL de la muestra en lugar de la solución estándar. Para limpiar la sonda, se utilizó una solución enjuague ISA en lugar de agua desionizada.

2.4.2. Análisis cuantitativo de As.

Para determinar la concentración cuantitativa inicial de As se envió una muestra de 1L de agua al laboratorio acreditado. Se empleó el método de plasma de acoplamiento inductivo (ICP-AES), el cual es reconocido por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) bajo el método EPA 200.7. Además, se llevaron a cabo las mediciones de otros elementos presentes en el agua como Ca, Co, Cu, Cr, Fe, Mg, Mn, Ni, Pb, K, Na y CN, con el propósito de evaluar si el sistema de ED es capaz de remover otro tipo de contaminantes que representan un gran riesgo para la salud.

2.4.3. Experimentación.

2.4.3.1. Sistemas de electrodiálisis y membranas.

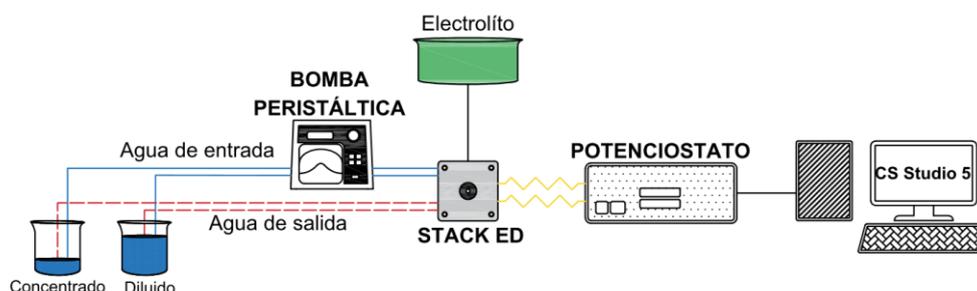
La remoción de As del agua se llevó a cabo mediante el uso de la tecnología avanzada de ED. Para la configuración del stack (Figura 2.1) se utilizaron cuatro membranas de intercambio catiónico (CEM, Tipo 2, FujiFilm) y tres membranas de intercambio aniónico (AEM, Tipo 2, FujiFilm). Entre cada membrana se colocó una junta espaciadora que

consiste en una malla que soporta las membranas y controla la distribución del flujo en cada celda. El sistema de electrodos se compone de electrodos y el electrolito dispuesto en los compartimientos de los electrodos, permitiendo la conversión de la corriente iónica en corriente eléctrica mediante procesos de reacciones redox.

Se utilizaron 4 L de electrolito, para ella se agregaron 4 g de Na_2SO_4 (J.T.Baker, 99% pureza) para alcanzar una conductividad de $1500 \mu\text{S}/\text{cm}$. En la Figura 2.13 se detalla el sistema de ED, consta del stack elaborado mediante impresión 3D, una bomba peristáltica Landto Tech (BT600F) y un cabezal (YZ15). La bomba peristáltica se empleó para controlar el caudal en mL/min, mientras que el potencióstato se utiliza para generar el potencial eléctrico. Las condiciones iniciales del potencial eléctrico, como el voltaje y la intensidad de la corriente eléctrica, son configuradas a través del software CS Studio 5.

Figura 2.13

Esquema del sistema de tratamiento de ED



Nota. El sistema de ED incluye componentes como una bomba peristáltica, stack de ED y potencióstato,

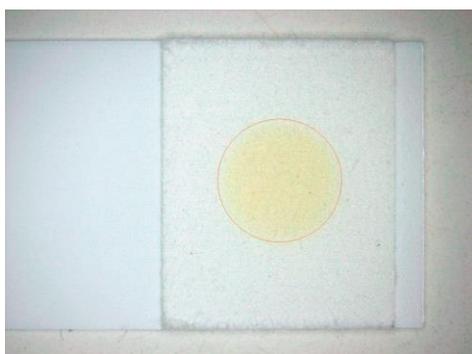
2.4.3.2. Registro fotográfico.

Este procedimiento se llevó a cabo en el Laboratorio de Archeobotánica de la Facultad de Ciencias Sociales y Humanísticas (FCSH). Para el registro fotográfico de las tiras reactivas de As, se utilizó un microscopio estereoscópico ZEISS (Stemi 2000C). Las tiras de ensayo se colocaron con la almohadilla orientada hacia arriba, asegurándose de que estuvieran centradas sobre la platina del microscopio. Luego mediante software Infinity Analyze y una

cámara Lumera INFINITY2-1RC (0197771) acoplada al ocular del microscopio se realizó la captura de imágenes de las tiras de ensayo. Este procedimiento permitió documentar visualmente los resultados relacionados con la pigmentación de las tiras reactivas, lo que es fundamental en la evaluación de la presencia y concentración de As. En la Figura 2.14 se muestra el registro fotográfico de una tira reactiva.

Figura 2.14

Registro fotográfico de la tira reactiva de la prueba de As de HACH



Nota. Fotografía tomada en el laboratorio de Arqueobotánica

2.4.3.3. Procedimiento experimental.

Se dispusieron de dos recipientes para contener el volumen necesario a tratar durante los ensayos, en los recipientes se recolectaron el flujo del diluido y del concentrado. Se instalaron mangueras para permitir el flujo de entrada y de salida hacia el stack. En la bomba peristáltica se configuró el número de manguera (#17) y el caudal en [mL/min]. Fue necesario cebar las mangueras para evitar la presencia de burbujas en el sistema y que esto afectara al rendimiento del stack en la remoción del As. Por último, se conectaron los electrodos al potencióstato CorrTest (CS150) y se estableció el diferencial de potencial con el software CS Studio 5. Durante los ensayos se monitoreo la remoción de As mediante las tiras reactivas de As de HACH, hasta alcanzar una concentración de 0 ppb, lo que indicaba el final del ensayo.

Además, los parámetros de SDT y CE en intervalos de tiempo de 10 min, las mediciones se realizaron con el equipo multiparamétrico HACH (HQ40d). En los procesos

experimentales se evaluaron los parámetros de caudal, voltaje y volumen para determinar las condiciones óptimas de la configuración del stack, para remover la mayor cantidad de As a un menor consumo energético. Las variaciones con los que se trabajaron con cada uno de los parámetros se detallan en la Tabla 2.1.

2.4.3.3.1. Caudal

El caudal influye en la velocidad de transferencia de masa de los iones de As a través de las membranas. Un caudal más alto puede aumentar la velocidad de transferencia, lo que resulta en una mayor eficiencia de remoción. Sin embargo, un caudal excesivamente alto puede generar una mayor resistencia al flujo y una menor eficiencia de remoción. Además, la variación del caudal puede afectar la distribución de corriente en la celda de ED. Un caudal más alto puede generar una mayor resistencia al flujo y una distribución de corriente no uniforme, lo que puede afectar la remoción y la vida útil de las membranas.

2.4.3.3.2. Voltaje

La diferencia de potencial eléctrico aplicada al stack de ED también influye en la velocidad de transferencia de masa de los iones. Además, puede afectar la distribución de corriente en el stack.

Un voltaje más alto puede generar una distribución de corriente no uniforme, lo que puede afectar la eficiencia de remoción y la vida útil de las membranas. También puede tener un impacto en el consumo de energía del sistema. Un voltaje más alto puede requerir una mayor energía para mantener la corriente y superar la resistencia al flujo, lo que puede aumentar el consumo de energía total del sistema.

2.4.3.3.3. Volumen

Las variaciones de volumen permitieron evaluar el comportamiento del sistema ante diferentes cargas de agua. El volumen de alimentación influye en las concentraciones de arsénico en la solución de entrada. Al realizar variaciones, se puede comprender cómo el sistema responde a distintos niveles de contaminación.

Por otra parte, las variaciones de volumen inciden en la eficiencia de la generación de corriente eléctrica. La concentración de iones en el agua de alimentación puede impactar en la generación de corriente eléctrica y, por consiguiente, en la eficacia de ED. Las variaciones de volumen pueden impactar en la formación de depósitos o taponamiento de las membranas, lo que afecta de manera negativa la eficiencia del sistema. En la tabla 2.1 se detallan los ensayos que se realizaron, y las diferentes variables que se estudiaron

Tabla 2.1

Condiciones experimentales de los ensayos llevados a cabo con el stack de ED

Condiciones experimentales	
VARIABLES DE DISEÑO	PARÁMETROS DE DISEÑO
Q = 100 mL/min	V=1 L 2V 80% Recuperación
Q = 100 mL/min Q = 200 mL/min Q = 400 mL/min Q = 600 mL/min	V=1 L 4V 80% Recuperación
Q = 200 mL/min Q = 400 mL/min Q = 600 mL/min	V=1 L 6V 80% Recuperación
Q = 200 mL/min Q = 400 mL/min Q = 600 mL/min	V=2 L 4V 80% Recuperación
Q = 200 mL/min Q = 400 mL/min Q = 600 mL/min	V=2 L 6V 80% Recuperación
V = 4000 mL V= 6000 mL	Q = 500 mL/min 4V 80% Recuperación
V = 4000 mL V= 6000 mL	Q = 500 mL/min 6V 80% Recuperación

Nota. Se presentan las variaciones de los parámetros de diseño. Voltaje, caudal y volumen

2.4.3.4. Plan de trabajo

En la Tabla 2.2, se detalla el plan de trabajo que se implementará para llevar a cabo el desarrollo del presente proyecto. En ella, se presentan las diversas actividades a realizar, así como las fechas de inicio y conclusión de cada una. Se destaca las actividades de campo para la recolección de muestras, un paso esencial para llevar a cabo las experimentaciones con el stack de ED. La etapa de experimentación se estructura en dos fases: una inicial que proporcionará resultados semicuantitativos, seguida por una segunda fase que arrojará resultados cuantitativos para validar los hallazgos iniciales. Estos resultados desempeñarán un papel crucial en la formulación del diseño del sistema de tratamiento avanzado mediante ED. Además, se llevará a cabo la elaboración de un sistema de pretratamiento y postratamiento, así como un análisis exhaustivo del impacto ambiental asociado al proyecto.

Tabla 2.2

Duración de actividades a realizar para el desarrollo del proyecto

N	ACTIVIDAD	INICIO DE ACTIVIDAD	FIN DE ACTIVIDAD	22/07/2023	24/07/2023	4/9/2023	4/10/2023	9/10/2023	17/11/2023	30/11/2023	4/11/2023	5/11/2023	9/11/2023	13/11/2023	19/12/2023	20/12/2023	28/12/2023	3/1/2024	12/1/2024	26/01/2024
1	Salida de campo. Recolección de muestra de agua superficial	22/07/2023	22/7/2023																	
2	Análisis de iones mayoritarios	24/07/2023	24/07/2023																	
3	Experimentación con stack de ED. Pruebas semi-cuantitativas	4/9/2023	4/10/2023																	
4	Redacción de memoria técnica	9/10/2023	26/01/2024																	
5	Experimentación con stack de ED. Pruebas cuantitativas	17/11/2023	30/11/2023																	
6	Análisis de impacto ambiental	4/11/2023	5/11/2023																	
7	Elaboración de planos	5/11/2023	9/11/2023																	
8	Diseño de sistema de pretratamiento y postratamiento	13/11/2023	19/12/2023																	
9	Diseño de sistema de ED	20/12/2023	28/12/2023																	
10	Elaboración de presupuesto	3/1/2024	12/1/2024																	
11	Entrega de memoria técnica	26/01/2024	26/01/2024																	

2.5. *Análisis de datos*

2.5.1. Balance iónico.

El análisis del balance iónico del agua permite evaluar la consistencia de los resultados obtenidos en la determinación de las concentraciones de iones principales. Este cálculo revela si la suma de miliequivalentes de iones aniónicos es igual al valor de miliequivalentes de iones catiónicos, lo que proporciona información sobre la precisión de las mediciones. Un error aceptable del balance iónico es de $\pm 10\%$.

La ecuación 2.4 para determinar el porcentaje de error es la siguiente:

$$\%Error = \frac{\sum cationes - \sum aniones}{\sum cationes + \sum aniones} * 100 \quad 2.4$$

2.5.2. Caracterización del agua.

Para la identificación del tipo de agua se empleó el diagrama de Stiff, que es una herramienta gráfica útil en la caracterización de aguas subterráneas y superficiales, ya que ayuda a identificar el tipo de agua y comprender mejor la geoquímica del agua. En un diagrama de Stiff, los iones se colocan en el eje vertical y las concentraciones se representan en el eje horizontal. La distancia y la posición de estos puntos en la gráfica reflejan sus concentraciones relativas en la muestra de agua.

Los diagramas de Stiff se realizaron con el software AquaChem (versión 11). Los datos obtenidos de las experimentaciones se representan en gráficas desarrolladas con el software OriginPro (versión 23b).

2.6. *Análisis de alternativas*

La concentración semi-cuantitativa de As total en la muestra de agua recolectada fue determinada por el método HACH (326.98.00005). Esta etapa tenía como objetivo establecer las condiciones experimentales para el análisis cuantitativo determinado por el método de plasma acoplado inductivamente - espectrometría de masas (EPA 6020B).

Este proceso garantiza la evaluación de la concentración de As en las muestras de agua. A través de una revisión de literatura, se llevó a cabo la evaluación de tres tecnologías destinadas a la eliminación de As. En base a este análisis, se determinó cuál de estas tecnologías es la opción más adecuada para su implementación en el presente proyecto, de tal manera que se obtenga una mayor remoción de contaminante a un menor costo. Las alternativas propuestas fueron:

- Precipitación química
- Ósmosis inversa
- Electrodialisis

2.6.1. Criterios de evaluación de las alternativas.

Los criterios de evaluación fueron los siguientes:

i. Técnico

En este criterio se evaluó la capacidad de cada tecnología para reducir las concentraciones de As dentro de los estándares permitidos para agua potable.

ii. Económico

Indicador sobre el consumo energético que la tecnología requiere para llevar a cabo la remoción del As, en términos de energía específica (kWh/m^3) que se utiliza para obtener agua apta para el consumo humano.

iii. Ambiental

Se tomó en cuenta la cantidad y la naturaleza de los residuos producidos durante el proceso de eliminación de As. La generación de residuos debe ser mínima, de tal forma que se minimice el impacto ambiental.

iv. Social

Este factor determina la capacidad de la tecnología para adaptarse a diferentes escalas de tratamiento y condiciones de agua.

En la Tabla 2.3 se destaca la importancia de los criterios y factores de evaluación para la selección de alternativa

Tabla 2.3

Criterios y factores de evaluación para la selección de alternativa óptima de tratamiento de agua con concentraciones de As

Criterio	Factores	Importancia
Técnico	Porcentaje de recuperación	Alto porcentaje de recuperación es esencial para garantizar la calidad de agua potable y la preservación de los recursos hídricos
Económico	Energía específica	Un menor consumo de energía por parte del sistema de remoción de As ofrece una solución viable en términos energéticos y económicos
Ambiental	Generación de residuos	Minimizar la generación de residuos para reducir al mínimo el impacto ambiental
Social	Escalabilidad y adaptabilidad	Versatilidad del sistema para adaptarse a diversas escalas de tratamiento según las condiciones del agua y del área de estudio

Nota. Se detalla la importancia de evaluar cada criterio para cada alternativa.

2.6.2. Técnicas convencionales

2.6.2.1. Técnico.

Montes-Hernandez et al. (2009) realizó una investigación sobre la eliminación de iones metálicos de aguas residuales sintéticas mediante el uso de carbonatación de hidróxido de calcio (CaOH) bajo presión moderada (20 bar) y temperatura (30 °C).

Esta reacción de carbonatación promovió la eliminación de arseniato en un 78%. La eficiencia de eliminación se calculó mediante un balance de masa simple en el sistema, utilizando las concentraciones iniciales y de equilibrio, empleando la ecuación (2.5

$$\% \text{ Remoción} = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \times 100 \quad (2.5)$$

Donde C_0 representa la concentración inicial de arseniato [mg/L], y C_e representa la concentración de arseniato en equilibrio [mg/L].

En un sistema de coagulación-floculación destinado a la eliminación de As del agua, Bilici Baskan & Pala (2010) lograron una eficiencia de remoción del 40.83%. Este rendimiento se alcanzó partiendo de una concentración inicial de As de 1000 µg/L mediante la adición 40.25 mg/L sulfato de aluminio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) como coagulante. Además, mencionó que, para concentraciones bajas de As, se precisa de una dosis elevada de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ para obtener una eficiencia destacada de eliminación de As. No obstante, se destaca la importancia de monitorizar la concentración residual de aluminio tras el proceso de coagulación, dado que concentraciones elevadas de aluminio pueden generar efectos adversos para la salud.

2.6.2.2. Económico.

Kongsricharoen & Polprasert. (1995) determinaron que el consumo de energía específica en un sistema de precipitación electroquímica para eliminar contaminantes en aguas residuales se encontraba en un rango de 8.8-12 kWh/m³. Para un sistema de coagulación-floculación el consumo energético se da por los agitadores mecánicos, que se encargan de mezclar los coagulantes con el agua a tratar, promoviendo la formación de flóculos y

facilitando la remoción de contaminantes. El consumo energético de los agitadores mecánicos puede variar dependiendo de factores como el tamaño del sistema, velocidad de agitación requerida, tipo de agitador y la viscosidad del agua. Con la ecuación 2.6 se obtiene la potencia requerida por el floculador para llevar a cabo el ensayo de test de jarras.

$$P = G^2 * \mu * V \quad (2.7)$$

Donde:

G es el gradiente de velocidad [1/s]

μ es viscosidad dinámica [N*s/m²]

V es volumen de agua tratada

El gradiente de velocidad es determinado por las revoluciones por minutos que se alcanzan durante el ensayo de floculación.

$$100 \frac{rev}{min} * 1 \frac{min}{60 s} * \frac{2\pi rad}{1 rev} = 10.47 \frac{1}{s}$$

Se reemplaza el resultado anterior en la ecuación (2.7)

$$P = \left(\frac{10.47}{s}\right)^2 * \left(1 \times 10^3 \frac{Ns}{m^2}\right) * (0.001 m^3)$$

$$P = 109.62 W$$

$$P = 109.62 W * \frac{1 kW}{1000 W} * 21 min * \frac{1 h}{60 min}$$

$$P = 0.04 \frac{kWh}{m^3}$$

Aunque se logra una eficiencia energética baja a escala de laboratorio con tratamientos convencionales como la floculación, se debe tener presente que la implementación de estos procesos a una escala mayor para abastecer a una comunidad conlleva un aumento significativo en el consumo energético y una inversión en infraestructura.

2.6.2.3. Social.

Se ha comprobado que la precipitación con cal y un sistema de coagulación-floculación es un método convencional efectivo para tratar efluentes inorgánicos con concentraciones de metales superiores a 1000 mg/L, aunque la efectividad está sujeta a las condiciones locales

en las que se implemente el sistema. Para comunidades con un bajo caudal, es necesario adaptar y optimizar los sistemas de precipitación química existentes o considerar alternativas más adecuadas. Estos sistemas suelen requerir una infraestructura adecuada, como tanques de reacción, equipos de dosificación de reactivos y sistemas de separación de lodos, que pueden resultar costosos de instalar y mantener en comunidades con recursos limitados.

Por otro lado, la aplicación de un sistema de coagulación-floculación, el uso de coagulantes como el $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ y la gestión de los residuos generados pueden aumentar los costos operativos del sistema de tratamiento de agua. (Barakat, 2011).

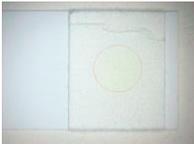
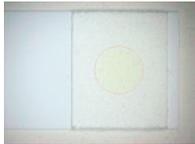
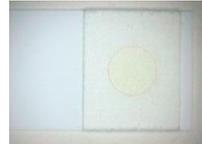
2.6.2.4. Ambiental.

Se debe tener en cuenta que los residuos generados pueden contener metales pesados y otros contaminantes, por lo que deben ser manejados y eliminados de manera segura. Los residuos sólidos pueden ser tratados mediante técnicas como la solidificación, la estabilización o la encapsulación. Además, estos procesos no son capaces de alcanzar los límites de concentración de metales requeridos para la descarga, que suelen estar en el rango de 0.1 y 3 mg/L. La cantidad de residuos generados depende de factores, como la concentración de metales pesados en el efluente, la cantidad y tipo de reactivos utilizados y el volumen del efluente tratado. Se estima que la cantidad de residuos sólidos generados por la precipitación química es del orden del 1-5% del volumen del efluente tratado (García & Alvarez, 2002).

En el presente proyecto para determinar la generación de residuos del proceso de coagulación-floculación se realizó un test de jarras añadiendo sulfato de aluminio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) al 1% como coagulante. Se añadió el coagulante en diferentes cantidades para evaluar el efecto que tiene su uso en la generación de lodos. Luego se midió la cantidad de sólidos sedimentables generados luego del proceso de adición del $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ a través del cono de Imhoff. Los resultados se presentan en la Tabla 2.4

Tabla 2.4

Cantidad de lodos generados luego del proceso de adición del coagulante

Concentración de coagulante [mg/L]	10	40	80	160
Cantidad de lodos generados [mL/L]	0.3	1.3	0.9	1.4
Concentración de As [ppb]	7	6	7	8
Registro fotográfico de remoción de As				

Nota. Tiempo de sedimentación 60 min

Según el GAD municipal del cantón Santa Rosa la PTAP Los Jardines tiene una capacidad para tratar y producir 540 L/s. Al trabajar la planta por 8 horas al día, el volumen diario de agua tratada es de 15 552 m³/diarios. Tomando en cuenta la concentración del coagulante de Al₂(SO₄)₃ al 1% de 80 mg/L, se tiene que:

$$\frac{8 \text{ mL Al}_2(\text{SO}_4)_3}{1 \text{ L H}_2\text{O}} * \frac{5 \text{ g Al}_2(\text{SO}_4)_3}{500 \text{ mL Al}_2(\text{SO}_4)_3} * \frac{1 \text{ kg Al}_2(\text{SO}_4)_3}{1000 \text{ g Al}_2(\text{SO}_4)_3} * \frac{1000 \text{ L H}_2\text{O}}{1 \text{ m}^3 \text{ H}_2\text{O}} = \frac{0.08 \text{ kg Al}_2(\text{SO}_4)_3}{\text{m}^3 \text{ H}_2\text{O}}$$

Por lo que eliminar el As de 15 552 m³ de agua tratada por medio de la adición de Al₂(SO₄)₃ como coagulante se necesitaría

$$\frac{0.08 \text{ Al}_2(\text{SO}_4)_3}{\text{m}^3 \text{ H}_2\text{O}} * 15 \text{ 552 m}^3 \text{ H}_2\text{O} = 1244 \text{ kg Al}_2(\text{SO}_4)_3$$

El costo de Al₂(SO₄)₃ por kg es de \$ 1.80. Por lo que el costo del proceso por medio de esta alternativa es de \$ 2239.488 al mes. En este valor no se considera el costo de instalación de una caseta de almacenamiento para el reactivo. Con la información obtenida en este apartado se asigna el puntaje a cada criterio de selección de alternativa como se muestra en la Tabla 2.5

Tabla 2.5

Puntaje asignado para cada criterio de evaluación para la tecnología convencional

Factor	Calificación (puntos)		
	5	10	15
Porcentaje de recuperación	-	X	-
Energía específica	X	-	-
Generación de residuos	X	-	-
Escalabilidad y adaptabilidad	X	-	-

Nota. Resultado de la evaluación de tecnología convencional

2.6.3. Alternativa 2: Osmosis Inversa.

2.6.3.1. Técnico.

En el estudio de Akin et al., (2011) se llevaron a cabo el análisis de la remoción de As (V) y As (III) en una muestra de agua subterránea con concentraciones iniciales de 50 µg/L y 12 µg/L, respectivamente. Los resultados revelaron el nivel de eficiencia en la remoción de estos compuestos, con un promedio de 96.8% de As (V) y 92.5% de As (III) siendo eliminados. En el contexto del estudio, el total de As en el permeado de la muestra alcanzó solo 2.86 µg/L, resultado que se encuentra por debajo de los límites recomendados por la OMS (10 µg/L).

Para el registro de resultados se recolectaron muestras del permeado cada hora y se determinaron las concentraciones de As. Se calculó tanto el rechazo del arseniato como del arsenito utilizando la ecuación 2.7

$$\%Remoción = \frac{CE_o - CE_f}{CE_o} * 100 \quad (2.7)$$

Donde $C_{permeado}$ y $C_{alimentación}$ representan las concentraciones de arseniato y arsenito en el permeado y agua de alimentación respectivamente.

2.6.3.2. Económico.

En el estudio de Urdánigo & Verdezoto (2023), se evaluó el consumo energético de un sistema de ósmosis inversa (OI) para el tratamiento de agua, los resultados presentaron un rango de variación entre 3.90 a 4.58 kWh/m³. No obstante, en el mismo estudio, se llevó a cabo una simulación con el objetivo de reducir el consumo eléctrico. Los resultados de esta simulación indicaron que, con una configuración optimizada del sistema de OI, el consumo de energía podría disminuir a rangos de 1.52 y 0.74 kWh/m³. Sin embargo, se debe destacar que, para lograr esta eficiencia mejorada, se requeriría de recursos adicionales y una implementación adecuada del diseño optimizado.

2.6.3.3. Ambiental.

La gestión del agua de rechazo en un sistema de OI destinado a la eliminación de contaminantes plantea un desafío significativo. Esta preocupación se relaciona con la eliminación del agua de rechazo, ya que en esta puede contener una concentración elevada de contaminantes eliminados. Cabe destacar que el proceso de OI suele tener una pérdida de agua sustancial, oscilando entre el 35% y el 65% en el lado del concentrado, que debe ser tratado de manera segura antes de su descarga al medio ambiente (Ingallinella et al., 2011). El porcentaje de efluente de rechazo del sistema de OI está dado por la ecuación 2.8

$$Residuos(\%) = \left[1 - \left(\frac{CE_o - CE_f}{CE_o} \right) \right] \quad (2.9)$$

2.6.3.4. Social.

La correcta implementación de soluciones de tratamiento de agua a nivel comunitario implica la necesidad de diseñar procesos eficaces y a su vez económicos. Uno de los principales desafíos radica en reducir los costos fijos asociados con las plantas de membranas. Además, en las áreas rurales a menudo enfrentan problemas relacionados con la disponibilidad limitada (o irregular) de suministro eléctrico, lo que puede afectar las operaciones del sistema, como el bombeo de agua y lavado de membranas.

Los sistemas de OI suelen requerir una presión de operación de 10-20 bar, lo que implica el uso de bombas de alta presión que consumen energía. Por lo que, la existencia de una fuente de suministro eléctrico confiable de 220 V es fundamental para garantizar el funcionamiento continuo de los equipos, sin embargo, en algunas zonas rurales, la infraestructura eléctrica es limitada, lo que complica el funcionamiento de tecnologías que requieren de energía eléctrica constante (Jadhav et al., 2015). En el Tabla 2.6 se detalla la ponderación de puntos que se le asignó a la tecnología de OI para remover arsénico para cada uno de los criterios de evaluación

Tabla 2.6

Puntaje asignado para cada criterio de evaluación para la tecnología de OI

Factor	Calificación (puntos)		
	5	10	15
Porcentaje de recuperación	-	-	X
Energía específica	-	X	-
Generación de residuos	X	-	-
Escalabilidad y adaptabilidad	-	X	-

Nota. Resultado de la evaluación de OI como tecnología alternativa.

2.6.4. Alternativa 3: Electrodiálisis.

2.6.4.1. Técnico.

En el estudio de González et al. (2017) sobre la eficiencia del As en el agua a través de ED el agua tenía una concentración alta de As, llegando a 2.04 mg/L. Las pruebas se llevaron a cabo utilizando agua de fuente subterránea como fuente de alimentación. Se trabajó con un sistema batch de ED, con un stack que contaba con 20 pares de celdas. Se utilizaron membranas aniónicas y catiónicas PC-SA y PC-SK.

Los resultados presentaron una eficaz eliminación de As, con porcentajes de eliminación que alcanzaron valores de 98.1%. En el presente proyecto se realizaron ensayos experimentales que consistieron en circular el agua a través del stack de ED conformado por 3 pares de membranas y monitorear la remoción de As mediante las pruebas semi-cuantitativas con tiras reactivas. Los resultados presentados se trabajaron bajo las siguientes condiciones volumen: 1 L y porcentaje de recuperación de 80%

El caudal de alimentación se refiere a la cantidad de agua que se introduce en el sistema de ED en un período de tiempo determinado. Para un caudal de 200 mL/min se evidenció una velocidad lineal transferencia de masa de 3.86 cm/s lo cual adecuada para el sistema de ED. La velocidad lineal fue determinada por la ecuación (2.10)

$$v = \frac{Q}{8 * 0.027 M} \quad (2.10)$$

Donde Q es el caudal y M es el número de pares de membranas utilizado en el sistema. Para el sistema de ED el rango de velocidades aceptable está en 1.5 a 5 cm/s. Se incrementó el caudal a 400 y 600 mL/min alcanzando velocidades de 7.72 y 11.57 cm/s respectivamente. El aumento del caudal se lo realizó con la finalidad de tratar mayor cantidad de agua en el mismo período de tiempo. Sin embargo, aumentar el caudal hasta 600 mL/min se generó una resistencia al flujo y pérdida de presión en el sistema lo que afectaba a la estabilidad del sistema. Por lo que se disminuyó el caudal a 500 mL/min, resultando en una velocidad de 9.65 cm/s. A pesar de no estar en el rango de velocidades aceptables, se evidenció que ya no había pérdida de presión indicando la capacidad de tratar más agua de manera efectiva.

Por otro lado, el voltaje aplicado en el sistema impulsa la transferencia de iones a través de las membranas. Se realizaron variaciones de voltaje de 2, 4 y 6 V. Al aplicar el voltaje, se observa una eliminación progresiva de As, pero esta no sigue una tendencia lineal. Se determinó una función polinómica de grado 3 que representa el comportamiento

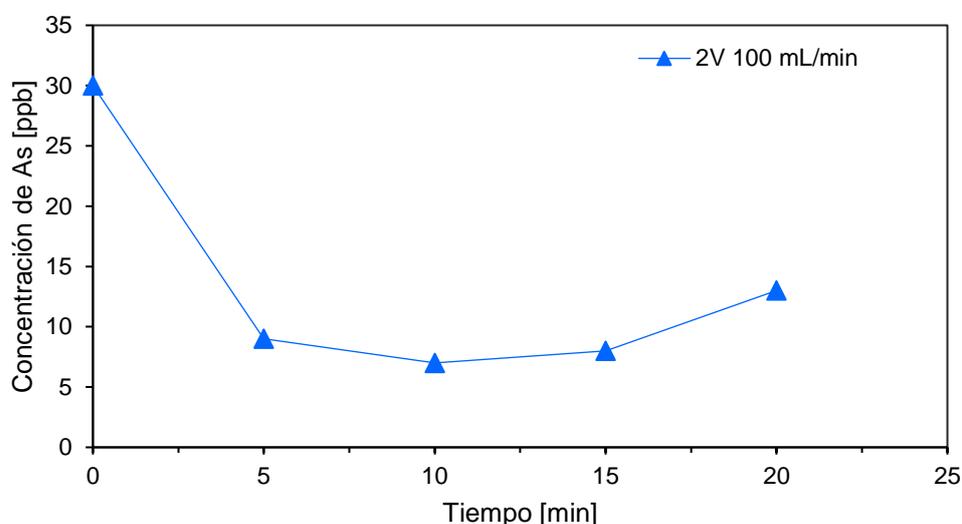
de la remoción de As en el concentrado. Esta función se deriva para obtener la relación con respecto al tiempo y así calcular la tasa de remoción de As.

En la Figura 2.15a se muestran los resultados de los rangos de As semi-cuantitativos versus el tiempo de ED acorde a las variaciones de caudal experimentales al 80% de recuperación y un voltaje de 2 V. Al experimentar con un voltaje de 2 V, no existe remoción de As significativo según el monitoreo de las pruebas semi-cuantitativas, por lo que se descarta trabajar con ese voltaje.

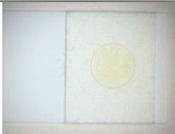
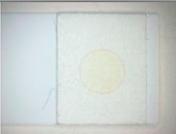
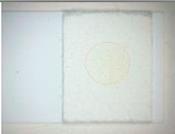
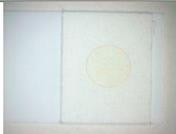
Figura 2.15

a) Resultados de la concentración de As de las pruebas semi-cuantitativas de la remoción de As en función del tiempo. b) Registro fotográfico de las pruebas semi-cuantitativas

a)



b)

Concentración inicial de As	Tiempo [min]	30	60	90	120
30 ppb					
	 2 V 100mL/min				

Nota. Condiciones experimentales: Volumen=1000 mL; Voltaje= 2 V; 80 % de recuperación

En la Figura 2.16a se presentan los resultados de la remoción de As de las pruebas semi-cuantitativas en función del tiempo acorde a las variaciones de caudal experimentales

al 80% de recuperación y un voltaje de 4 V. En el instante inicial ($t= 0$ min) no se evidencia una remoción de As dado que aún no se ha aplicado voltaje al sistema. Al aplicar el voltaje, y con las variaciones de caudal de 200 y 400 mL/min se observa una eliminación gradual de As. Sin embargo, con el caudal de 600 mL/min, a los 60 min se observa una aumentó en la concentración de As lo que sugiere posibles limitaciones en el sistema de ED al trabajar con caudales elevados. Además, en la Figura 2.16a se presentó la función polinómica de grado 3 por ensayo, la cuales fueron derivadas para obtener una función de pendientes con respecto al tiempo. Las funciones se evaluaron en tiempo $t=120$ para determinar la tasa de remoción de As. Estos resultados se presentan a continuación:

$$f'(t: 120) = \frac{-3x^2 - 620x + 32975}{50000} = -1.6925 \mu S/cm/min$$

$$f'(t: 120) = \frac{-9x^2 - 1450x + 54505}{50000} = -3.4205 \mu S/cm/min$$

$$f'(t: 120) = \frac{-3x^2 - 510x + 25335}{50000} = -1.5813 \mu S/cm/min$$

Estos resultados indican que bajo las condiciones experimentales de: 4V, 400 mL/min, y 80% de recuperación, se observa una tasa de remoción mayor (-3.205 $\mu S/cm/min$) en comparación con la tasa de remoción de As obtenida de los caudales de 200 y 600 mL/min.

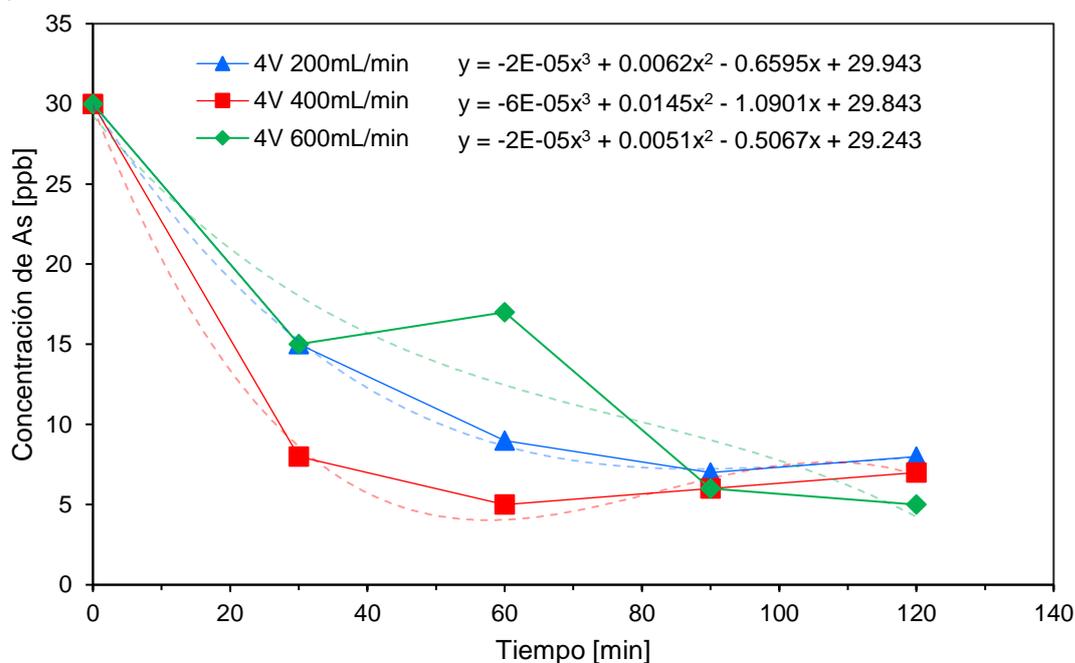
Además, en la Figura 2.16a se destaca que, a los 90min de experimentación, en los tres caudales que se probaron (200, 400, y 600 mL/min) la concentración de As es de 6 ppb, lo que significaría una remoción de As del 80%, según los resultados de las pruebas semi-quantitativas. Este período de experimentación sirve como indicador del tiempo de experimentación necesario para remover la mayor concentración de As. En Figura 2.16b, se presenta el registro fotográfico de las pruebas semi-cuantitativas realizadas cada 60 min, donde se evidencia la remoción de As en función del tiempo. La intensidad en la coloración indica una mayor concentración de As, en el tiempo $t=120$ min se observa la menor

coloración de la tirilla. Sin embargo, se observa una leve pigmentación, lo que indica que aún hay presencia de As. Por esta razón, se debe corroborar esta información con los resultados cuantitativos.

Figura 2.16

a) Resultados de la concentración de As de las pruebas semi-cuantitativas de la remoción de As en función del tiempo. b) Registro fotográfico de las pruebas semi-cuantitativas en función del tiempo

a)



b)

Concentración inicial de As	Tiempo [min]	30	60	90	120
30 ppb	 4 V 200mL/min				
	 4 V 400mL/min				
	 4 V 600mL/min				

Nota. Condiciones experimentales: Volumen: 1000 mL; Voltaje: 4 V; 80 % de recuperación

En la Figura 2.17a se muestran los resultados de la remoción de As de las pruebas semi-cuantitativas en función del tiempo acorde a las variaciones de caudal experimentales al 80% de recuperación y un voltaje de 6 V. Se observa que, a los 30 min de experimentación se alcanzó una remoción del 80% para los diferentes caudales con los que se trabajaron (200, 400, y 600 mL/min). Estos resultados al ser comparados con los ensayos en los que se utilizaron 4 V, se alcanzó el mismo porcentaje de remoción disminuyendo el tiempo de experimentación en 60 min. De esta manera se observa del comportamiento del voltaje sobre la remoción de As; aumentar el voltaje disminuye el tiempo de experimentación para remoción de As. Además, en la Figura 2.17a se presentan las funciones polinómicas de grado 3 para cada ensayo. Esta función es derivada y evaluada en $t = 120$ para determinar la tasa de remoción de As. Los resultados son presentados a continuación

$$f'(t: 120) = \frac{-3x^2 - 414x + 13329}{10000} = -7.9551 \mu\text{S}/\text{cm}/\text{min}$$

$$f'(t: 120) = \frac{3x^2 - 170x - 15970}{50000} = -0.1366 \mu\text{S}/\text{cm}/\text{min}$$

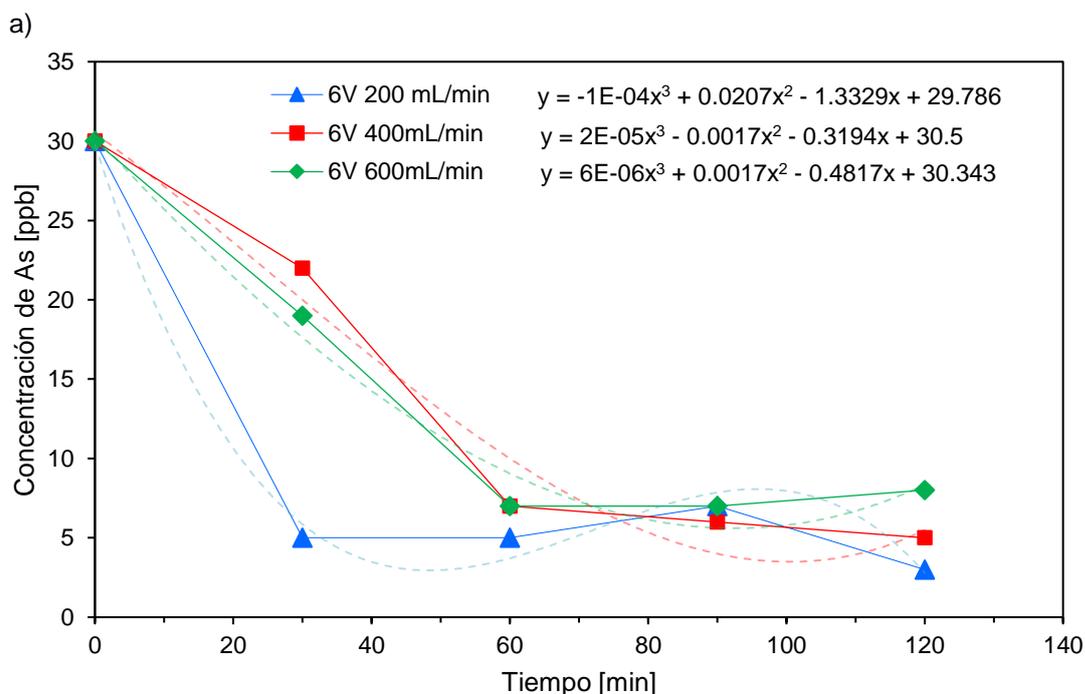
$$f'(t: 120) = \frac{-9x^2 - 1700x + 240850}{500000} = -0.1855 \mu\text{S}/\text{cm}/\text{min}$$

La mayor tasa de remoción de As se presentó en las condiciones experimentales de 6 V, 200 mL/min y 80% de recuperación, alcanzado un valor de $-7.9551 \mu\text{S}/\text{cm}/\text{min}$. Esta tasa superó la mayor tasa de remoción obtenida con 4 V, indicando que un aumento en el voltaje está asociado con una mayor tasa de remoción de As. En la figura Figura 2.17b se observa el registro fotográfico de las pruebas semi-cuantitativas de As. Para un caudal de 200 mL/min a 120 min se presentó la menor concentración de As de 3 ppb, mientras que para los caudales de 400 y 600 mL/min la menor concentración se presentó a 90 min de 6 y 7 ppb respectivamente. Esta variación en la concentración de As en función del tiempo se debe comprobar con los resultados de ensayos cuantitativos.

Los resultados experimentales de las pruebas semi-cuantitativas indican que emplear un voltaje de 6 V en un sistema de ED permite la remoción de As en menor tiempo en comparación con el uso de voltajes de 2 y 4 V.

Figura 2.17

a) Resultados de la concentración de As de las pruebas semi-cuantitativas de la remoción de As en función del tiempo. b) Registro fotográfico de las pruebas semi-cuantitativas en función del tiempo



b)

Concentración inicial de As		Tiempo [min]			
30 ppb		30	60	90	120
	 6 V 200mL/min				
	 6 V 400mL/min				
	 6 V 600mL/min				

Nota. Condiciones experimentales: Volumen 1000 mL; Voltaje 6 V; 80 % de recuperación

2.6.4.2. Económico.

El proyecto de Espinoza & Franco (2022) resalta el uso de una tecnología como ED por sus resultados en términos de eficiencia energética. A través de experimentos donde se exploraron variables como, el caudal, el voltaje y el volumen, se logró identificar una configuración adecuada para el sistema de ED. Esto resultó en una optimización de consumo de energía, que se redujo a tan solo 0.866 kWh/m³ con un costo de \$ 0.08 por m³ de agua a tratar. Este hallazgo subraya el potencial de la electrodiálisis como una tecnología eficiente desde el punto de vista energético.

En el proyecto para determinar el consumo energético de la operación de remoción de As mediante ED, se registraron los datos del voltaje suministrado al sistema y la corriente media. Estos valores fueron obtenidos del software CS Studio 5, donde se fija el valor del voltaje que es constante durante la experimentación, mientras que la intensidad de corriente varía en función del tiempo. Bajo las condiciones experimentales de 200 mL/min, 6 V y 80% de recuperación se obtuvo una corriente media de 0.00917 A. La energía específica empleada por el sistema se calcula mediante la ecuación (2.11)

$$EE = \frac{V * I * t}{V * 60} * 1000 \quad (2.11)$$

Donde: V es voltaje [V], I es la corriente [A], t es el tiempo de experimentación [min] V es el volumen de agua del diluido [ml].

$$EE = \frac{6 * 0.00917 * 120}{800 * 60} * 1000 = 0.14 \text{ kW}/m^3$$

Este resultado indica que el consumo energético del sistema de ED para remoción de As es de 0.14 kW/m³, con respecto al costo energético promedio Ecuador, este valor representaría en un costo energético de \$0.013 por m³ agua tratada para remover As. El consumo bajo del sistema se traduce en una mayor eficiencia operativa y económica del sistema. Con costos de energía reducidos, los gastos operativos totales disminuyen, lo que puede hacer que el tratamiento del agua se más accesible y rentable.

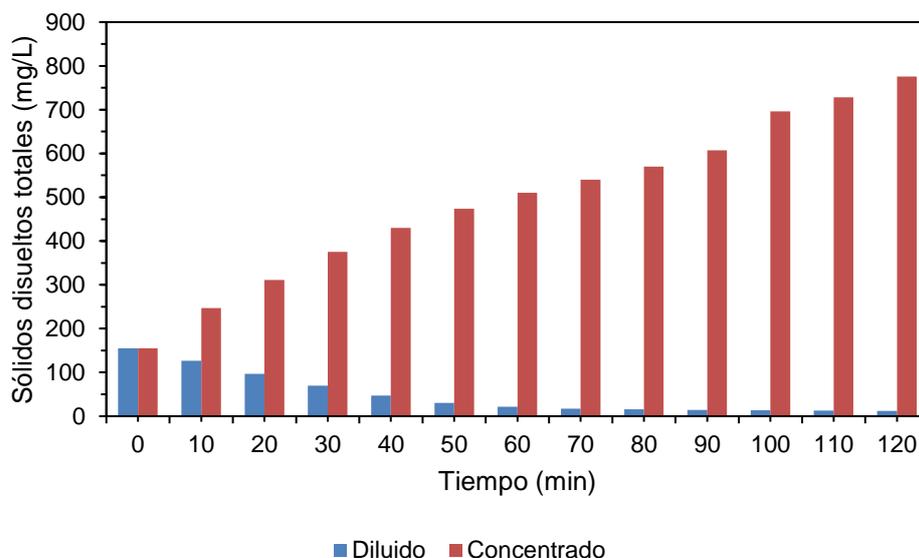
2.6.4.3. Ambiental.

En contraste con otros enfoques de tratamiento de agua, como la precipitación química, la ED presenta la ventaja de no generar grandes volúmenes de lodos o precipitados. Esta particularidad se debe a que el proceso de separación de contaminantes se da a nivel iónico, sin la formación de productos secundarios sólidos. Por lo tanto, se reduce la cantidad de residuos sólidos producidos, al tiempo que se simplifica el proceso de disposición final de estos residuos. (Cañas Kurz et al., 2021). Además, la implementación de procesos como la inyección en formaciones geológicas para eliminar As concentrado en agua, permite la liberación de los residuos generados de manera segura sin afectar le medio ambiente.

En este estudio durante los ensayos de experimentación se monitorearon los parámetros de CE y SDT en intervalos de 10 minutos, durante el tiempo que duró el ensayo. El monitoreo se realizó tanto para el volumen del diluido como para el volumen del concentrado. En la Figura 2.18. se representa el comportamiento de la concentración de sales en el efluente del concentrado, mostrando el aumento de la concentración de las sales a medida que aumenta el tiempo de experimentación. Esta tendencia es un resultado esperado en un proceso de ED y que se repite en los diferentes ensayos realizados. Es importante que, en una etapa más madura de este proyecto, se tomen muestras de este concentrado para medir la concentración de As en el concentrado.

Figura 2.18

Variación de SDT en relación con el tiempo



Nota. Condiciones experimentales: Volumen = 1000 mL; Voltaje 4 V; 200 mL/min; 80 % de recuperación.

En la Tabla 2.7 se muestran los resultados de las pruebas semi-cuantitativas del efluente del sistema en función del tiempo, para determinar la cantidad de As que se está concentrando en el volumen del efluente. Los resultados indican un aumento de As a lo largo del tiempo, alcanzado los 20 ppb en $t = 90$ min. Luego en $t = 120$ min, se observa una disminución a 6 ppb. Este comportamiento puede atribuirse al procedimiento de las pruebas semi-cuantitativas, que implica la toma de 50 mL del volumen tratado. En $t = 120$ min, el volumen final se reduce a 200 mL desde el volumen inicial de 400 mL, lo que resulta en una menor concentración de As debido a la disminución del volumen. Esta tendencia debe ser validada mediante análisis cuantitativos.

Tabla 2.7

Registro fotográfico de la concentración de As en el agua de rechazo.

Registro fotográfico de remoción de As				
Concentración de As [ppb]	7	15	20	6
Tiempo [min]	30	60	90	120

Nota. Condición experimental: Caudal 200 mL/min, Volumen 2000L, Voltaje 6 V, 80% de recuperación

2.6.4.4. Social.

Según Malek et al. (2016) la ED se destaca como una tecnología de membrana impulsada eléctricamente que ofrece un bajo consumo de energía y una gran versatilidad en su diseño y aplicabilidad. Su adaptabilidad se deriva de su capacidad para ajustarse en función de factores como el número de habitantes, la disponibilidad de fuentes de energía, la calidad y cantidad de agua existente y los estándares de calidad deseados. Este rasgo se hace que la ED sea apta para regiones remotas y desconectadas de las redes eléctricas convencionales que necesitan de 220 V para operar, donde las fuentes de energía renovable son abundantes y donde la provisión de agua potable presenta contaminantes.

La energía específica determinada para el sistema de ED bajo las condiciones experimentales de 6 V, 200mL/min, 2000 L y 80% de recuperación es de 0.14 kW/m³. Por lo que se propone el uso de paneles solares que suministren la energía necesaria en lugar de una conexión de 220 V. El número de paneles es determinado por la ecuación 2.11

$$\text{Número de paneles} = \frac{C * 1.3}{t * P} \quad 2.11$$

Donde C: el consumo diario de energía de la planta [W], t: horas solar pico [h], P: potencia del panel solar [W].

$$\text{Número de paneles} = \frac{186240 * 1.3}{5 * 415} = 117 \text{ paneles}$$

Con un área unitaria de panel de 1.94 m² se determina que el área de paneles es de 226.98 m². Además, se realizó el dimensionamiento del inversor, que se encarga de convertir la corriente continua (CC) generada por los paneles solares en corriente alterna (CA). Para determinar la potencia del inversor se utilizó la ecuación 2.12

$$\text{Potencia del inversor} = \frac{P}{N * 1000} \quad 2.12$$

Donde N es el número de paneles

$$\text{Potencia del inversor} = \frac{415}{117 * 1000} = 40.46 \text{ kW}$$

En el Tabla 2.7 se detalla la ponderación de puntos que se le asignó a la tecnología de ED para remover As para cada uno de los criterios de evaluación

Tabla 2.8

Puntaje asignado para cada criterio de evaluación para la tecnología de ED

Factor	Calificación (puntos)		
	5	10	15
Porcentaje de recuperación	-	-	X
Energía específica	-	X	-
Generación de residuos	-	X	-
Escalabilidad y adaptabilidad	-	-	X

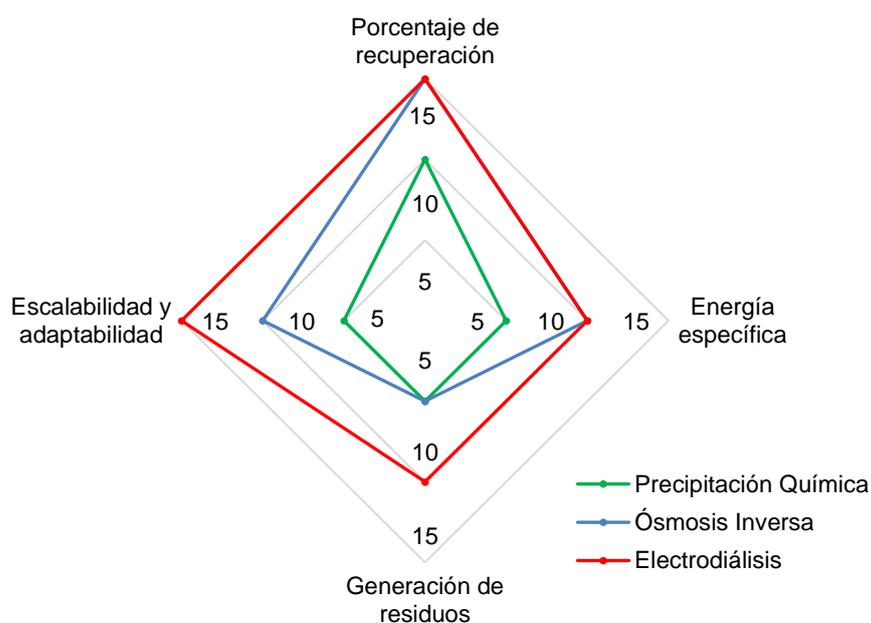
Nota. Resultado de la evaluación de ED como tecnología alternativa.

2.6.5. Selección de alternativa óptima.

La Figura 2.19 ilustra la ponderación asignada a cada tecnología de remoción de As según los criterios y factores de evaluación, donde cada uno recibe una puntuación entre 5 y 15 siendo 15 el de mejor rendimiento. El porcentaje de recuperación representa la cantidad de As eliminada por la tecnología con relación a una concentración inicial; a mayor porcentaje de remoción, mayor puntaje. La energía específica indica el consumo energético necesario para la operación; menor consumo recibe una puntuación más alta. La generación de residuos se refiere a la cantidad de lodos o volumen de agua concentrada con contaminantes producidos durante el proceso; a mayor cantidad de residuos, menor puntaje. La escalabilidad y adaptabilidad evalúan la facilidad con la que la tecnología se adapta a diferentes condiciones de trabajo, incluyendo escalas de tratamiento y condiciones del agua; un puntaje alto indica versatilidad para su aplicación en diversas condiciones.

Figura 2.19

Esquema radial de la ponderación de las diferentes tecnologías para remoción de As



Nota. Resultado general de la evaluación de tecnologías.

En base al análisis de alternativas en las que se evaluaron tres diferentes tipos de tecnologías para remoción de As del agua, cada una fue evaluada en los parámetros técnicos, económicos, ambientales y sociales. Los resultados son presentados en la Tabla 2.9 La elección de la tecnología de tratamiento más adecuada para la eliminación de As depende de múltiples factores y consideraciones técnicas. Las técnicas convencionales, se presentan como una opción económicamente viable, pero su eficacia puede variar según las condiciones locales y el tipo de agua. Sin embargo, su principal desventaja radica en la generación de residuos sólidos y la necesidad de productos químicos para su funcionamiento. Por otro lado, la OI se destaca por su alta eficiencia de remoción de As, hasta valores de 96.8%. No obstante, su alto costo de inversión inicial y la necesidad de energía eléctrica son desafíos para considerar, sobre todo en áreas rurales. Por último, la ED muestra una baja demanda de energía y un buen rendimiento de eliminación de As (98.1%), lo que la hace atractiva desde un punto de vista técnico y de sostenibilidad ambiental.

Tabla 2.9

Comparación de las distintas alternativas de tecnologías para la remoción de As del agua

Parámetro	Tecnología de remoción de As		
	Tecnologías convencionales	Ósmosis inversa	Electrodialisis
Porcentaje de remoción	78.00%	92.50%	98.10%
Energía específica	0.04 kWh/m ³	3.90-4.48 kWh/m ³	0.14-1.24 kWh/m ³
Generación de residuos	Alta	Media	Media
Escalabilidad y adaptabilidad	Baja	Media	Alta

Nota. Resultados de la evaluación de alternativas

Capítulo 3

3. Diseños y especificaciones

3.1. Diseños

El sistema de tratamiento avanzado para la remoción de As del agua, fue diseñado para atender las necesidades de una comunidad con una población de 5000 habitantes. Los parámetros de diseño desarrollados para el presente proyecto siguieron la regulación de la normativa CPE INEN 5 Parte 9-1:1992 que incluye las normas para estudio y diseño de sistemas de agua potable para poblaciones mayores a 1000 habitantes.

3.1.1. Población futura.

Para establecer la población de diseño se definió un período de diseño de 25 años considerando los 5 primeros años para el estudio de factibilidad para confirmar las decisiones tomadas en el estudio de prefactibilidad, y sea viable el desarrollo del proyecto desde el punto de vista técnico como financiero.

El último censo de población y vivienda realizado en Ecuador fue en 2010, en donde se reportó una tasa de crecimiento de 1.42 (INEC,2010). Para la estimación de la población futura se realizó la proyección del crecimiento poblacional bajo tres diferentes métodos: aritmético, geométrico y exponencial. En la Tabla 3.1 se muestra los diferentes métodos aplicados

Tabla 3.1

Métodos para establecer la población futura

Método Aritmético	Método Geométrico	Método exponencial
Asume un crecimiento constante añadido a la población existente durante cada período de tiempo	considera tasas de crecimiento constantes aplicadas a la población existente en cada período	Utiliza tasas de crecimiento que se aplican continuamente a la población, lo que resulta en un crecimiento exponencial
$P_f = P_o * (1 + r * n)$	$P_f = P_o * (1 + r)^n$	$P_f = P_o * e^{(r*n)}$

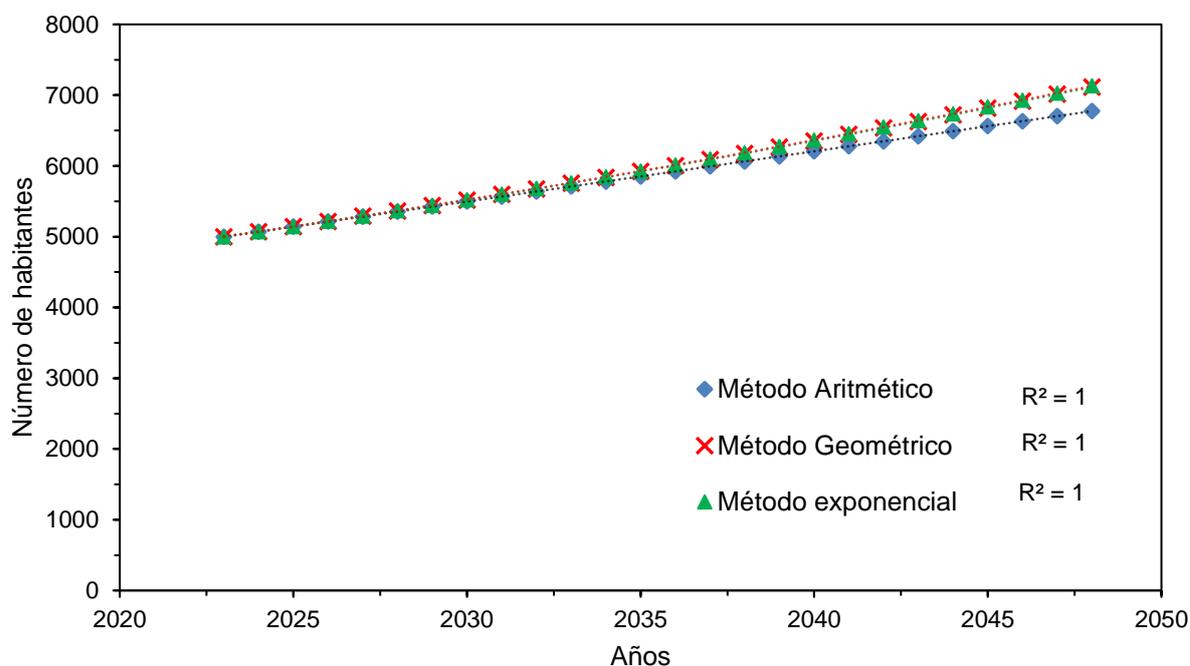
Nota. Donde: P_f es la población futura; P_o es la población actual; r es la tasa de crecimiento; n período de diseño

3.1.2. Población de diseño.

Al aplicar los tres métodos para determinar la población futura, se generó un gráfico que ilustra el crecimiento poblacional en función del tiempo. En la Figura 3.1 se aprecia el comportamiento poblacional según los distintos modelos matemáticos utilizados. Se observa que el modelo aritmético sigue una relación lineal, con un crecimiento poblacional constante. Por otro lado, los métodos geométrico y exponencial muestran un comportamiento similar, con un crecimiento poblacional que sigue una tendencia exponencial. Para el proyecto, se seleccionó el resultado del método que mejor se ajusta al crecimiento poblacional esperado para el cantón Santa Rosa. Además, presenta la condición menos favorable al exhibir el mayor crecimiento poblacional, estimándose en 121.225 habitantes.

Figura 3.1

Crecimiento poblacional del cantón Santa Rosa



Nota. Año inicial 2023; año al final del período de diseño 2049. Período de diseño de 25 años.

3.1.3. Dotación de diseño.

Para establecer la dotación de diseño, se utilizó la Tabla 3.2 proporcionada por CPE INEN 5 Parte 9-1, que sugiere el uso de dotaciones indicadas en la tabla cuando no se disponga de

datos específicos. Esta tabla presenta las dotaciones medias futuras en función del número de habitantes y las condiciones climáticas del lugar. Dado que Santa Rosa tiene un clima cálido y se proyecta una población de 7131 habitantes para el período de diseño, se considera una dotación de 200 litros por habitante por día

Tabla 3.2

Dotación media futura para poblaciones mayores a 1000 habitantes

Población (habitantes)	Clima	Dotación media futura (l/hab/día)
Hasta 5000	Frío	120 – 150
	Templado	130 – 160
	Cálido	170 – 200
5000 a 50 000	Frío	180 – 200
	Templado	190 – 220
	Cálido	200 – 230
Más de 50 000	Frío	> 200
	Templado	> 220
	Cálido	> 230

Nota. INEN (1992)

3.1.4. Variaciones de consumo.

3.1.4.1. Caudal medio.

Se determinaron las variaciones de consumo para el cantón Santa Rosa. Se determinó el caudal medio de diseño que se refiere a la cantidad promedio de agua que se estima que un sistema debe manejar durante un período de diseño. Se utilizó la ecuación (3.1) para determinar su valor

$$Q_m = \frac{f * (P * D)}{86400} \quad (3.1)$$

Donde:

Q_m es el caudal medio [L/s]

f es el factor de fugas

P población final del período de diseño

D dotación futura

Se consideró un factor de fugas el 20% al considerarse un nivel de servicio “IIa” según la normativa ya que en las conexiones domiciliarias cuenta con un grifo por casa, no obstante, no cuenta con un sistema de alcantarillado sanitario.

$$Q_m = \frac{1.20 * (7131 * 200)}{86400}$$

$$Q_m = 20 \text{ L/s}$$

3.1.4.2. Caudal máximo diario.

El caudal máximo diario es el caudal determinado en un día de máximo consumo, al final del período de diseño. Para determinar su valor se utilizó la ecuación (3.2) donde KMD es el coeficiente de variación de consumo máximo diario. Según la normativa este valor se puede encontrar entre 1.3 – 1.5. Para el presente proyecto se consideró un valor de 1.3

$$Q_{MD} = KMD * Q_m \quad (3.2)$$

$$Q_{MD} = 1.3 * 20$$

$$Q_{MD} = 26 \text{ L/s}$$

3.1.4.3. Caudal máximo horario.

El caudal máximo horario es el caudal punta de consumo en una hora al final del periodo de diseño. Para determinar su valor se utilizó la ecuación 3.3 donde KMH es el coeficiente de variación de consumo máximo horario. La normativa recomienda usar valores entre 2.0 – 2.3. Para el proyecto se utilizó un valor de 2.0.

$$Q_{MH} = KMH * Q_m \quad 3.3$$

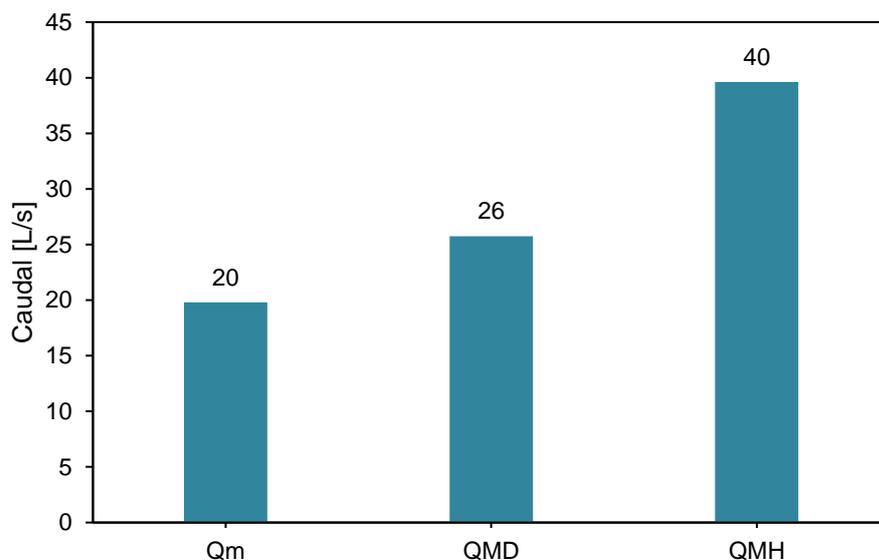
$$Q_{MH} = 2.0 * 20$$

$$Q_{MH} = 40 \text{ L/s}$$

Los resultados de las variaciones de consumo son presentados en la. Figura 3.2 Donde el caudal medio (Q_m) fue de 20 L/s, el caudal máximo diario (Q_{MD}) 26 L/s, y el caudal máximo horario (Q_{MH}) de 40 L/s.

Figura 3.2

Variaciones de consumo para el diseño del sistema de ED para la remoción de As en el cantón Santa Rosa



Nota. Resultados de las variaciones de consumo del cantón Santa Rosa.

3.1.5. Resultados de medición de parámetros in-situ.

3.1.5.1. Concentración semi-cuantitativa de As.

En la quebrada El Panteón, se detectó la presencia de As mediante una prueba de As semi-cuantitativa, con un rango de concentración entre 0.01 a 0.03 mg/L. Los resultados indican que la concentración de As supera el límite máximo establecido de 0.01 mg/L, según las normativas NTE INEN 1108, TULSMA, y OMS para agua de consumo humano. Esta situación es preocupante, ya que la quebrada El Panteón desemboca en el río Santa Rosa, fuente principal de abastecimiento de la PTAP. La planta utiliza un tratamiento convencional que implica procesos como coagulación-floculación, sedimentación, filtración y desinfección, que han evidenciado que no logran eliminar el As del agua, al haberse encontrado concentraciones de As en el agua de grifo de 0.38 Mg/L en la cabecera del cantón Santa Rosa.

3.1.5.2. Parámetros físico-químicos.

Los resultados de los parámetros físico-químicos medidos en la quebrada El Panteón se presentan en la Tabla 3.3. El pH del agua superficial registró un valor de 5.94, indicando un

carácter ácido. Este nivel de acidez puede atribuirse a la liberación de ácidos inorgánicos, como el ácido sulfúrico, generados durante los procesos de extracción de minerales asociados con la actividad minera presente en la zona. Además, la caracterización hidroquímica del cantón Santa Rosa revela que la CE del agua en la quebrada El Panteón es de 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$, según estudios previos de (Jiménez et al., 2021) Este valor es consistente con los resultados obtenidos durante la campaña de muestreo realizado en el marco del presente proyecto, como se detalla en la Tabla 3.3. Esta congruencia sugiere que las sales derivadas de la actividad minera no ejercen un impacto significativo sobre las aguas superficiales de la quebrada. Los resultados obtenidos indican que el agua no es salobre, por lo que se considera apta para la captación y tratamiento en una planta destinada a la obtención de agua de consumo humano.

Tabla 3.3

Parámetros fisicoquímicos medidos in situ en la quebrada El Panteón, Santa Rosa

pH	CE [$\mu\text{S}/\text{cm}$]	SDT [mg/L]	T [°C]	Turbidez [NTU]
5.94	304	146.5	22.6	18.01

Nota. Parámetros fisicoquímicos del agua muestreada.

3.1.6. Medición de parámetros en laboratorio.

3.1.6.1. Caracterización hidro química.

Los resultados de los iones mayoritarios de la muestra de agua tomada en la quebrada El Panteón se presentan en la Tabla 3.4. Se determinó el error de balance iónico que indica la diferencia entre la cantidad de cargas positivas y negativas que presenta la muestra. El error se produce cuando la suma de las concentraciones de iones positivos (cationes) no es igual a la suma de concentraciones de iones negativos (aniones), lo que debería ocurrir en una muestra químicamente equilibrada. El error de balance iónico encontrado a partir del ensayo de iones mayoritarios fue de 4.41% donde la suma de cationes fue de 3.08 [mEq/L] y de los aniones de 2.82 [mEq/L]. El error al ser menor de $\pm 10\%$ es aceptado ya que se

puede garantizar que los resultados son correctos y por lo tanto dar una interpretación real de la composición química del agua.

Tabla 3.4

Resultado de análisis de iones mayoritarios de la muestra de agua de la quebrada El Panteón, Santa Rosa

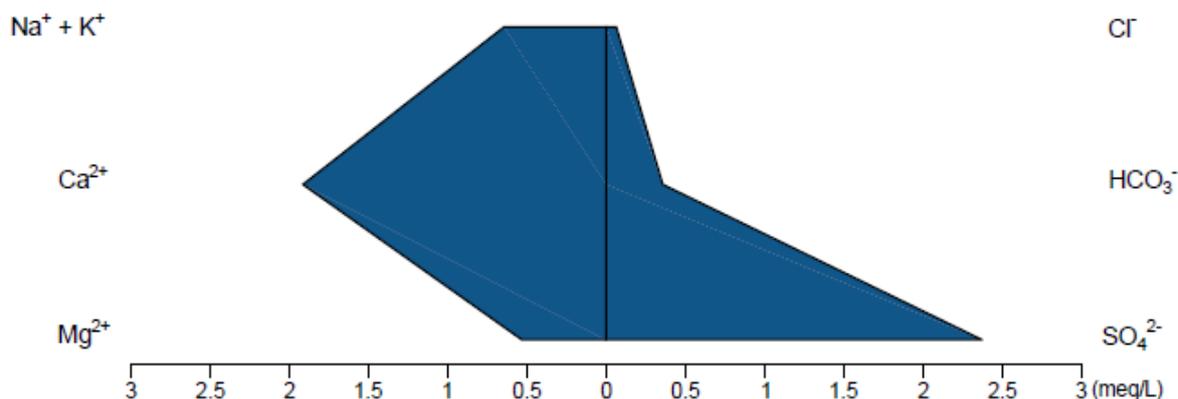
Ca²⁺	Mg²⁺	SO₄²⁻	Cl⁻	NO³⁻	NO²⁻	K⁺	Na⁺	HCO³⁻
38.4	7.8	115.0	2.0	0.4	0.001	1.2	11.2	22.0

Nota. Unidad de medida de las concentraciones (mg/L)

La Figura 3.3 muestra el diagrama de Stiff con las concentraciones de iones en mEq/L para cada uno de ellos. Este diagrama reveló que el agua muestreada es del tipo sulfatada cálcica-sódica, evidenciado por las concentraciones de 2.40 mEq/L de sulfatos, 1.92 mEq/L de calcio y 0.52 de los iones de sodio-potasio. Una de las formaciones geológicas identificadas en la quebrada El Panteón incluye esquistos verdes, negros y azules, los cuales, además de tener la capacidad de liberar As, contienen minerales ricos en sulfuros y calcio como la pirita y la calcita. Cuando estos minerales entran en contacto con el agua y están expuesto al oxígeno, experimentan procesos de oxidación liberando iones de sulfatos y calcio en el agua. En áreas de actividad minera, la exposición de minerales sulfurados en el agua y al aire pueden generar drenaje ácido de mina, liberando ácido sulfúrico y contribuyendo a la presencia de sulfatos en el agua. En el cantón Santa Rosa la ganadería es una actividad común, y se observan áreas cercanas a la quebrada El Panteón con cultivos de pasto destinados a la alimentación del ganado. La infiltración del agua en el suelo afectada por el uso de fertilizantes en las plantas puede contribuir a la presencia de iones de sodio y potasio en el agua de la zona. Este fenómeno resalta la interconexión entre las prácticas mineras, agrícolas y ganaderas con la calidad del agua en la región.

Figura 3.3

Diagrama de Stiff de la muestra de agua tomada de la quebrada el Panteón, Santa Rosa



Nota. Caracterización hidroquímica del agua muestreada.

3.1.6.2. Resultados de concentraciones de elementos potencialmente tóxicos.

Los resultados de las concentraciones de EPT se exhiben en la Tabla 3.5, junto con los LMP establecidos por la normativa TULSMA para agua de consumo humano. Los análisis realizados para los contaminantes Co, Cr, y CN total revelaron la ausencia de estos elementos en la muestra de agua, indicando su ausencia en la zona estudiada, Lo cual es positivo para la calidad del agua. Aunque se detectó la presencia de metales como Cu, Fe, Ni y Pb, sus niveles se mantienen por debajo de los límites máximos establecidos por la normativa, sugiriendo que el agua cumple con los estándares aceptables en términos de concentraciones de estos elementos. Sin embargo, se observó que la concentración inicial de As total fue de 0.02 ± 0.18 mg/L, superando el límite establecido de 0.01 mg/L, y la concentración inicial del Mn fue de 0.07 ± 0.14 mg/L, superando su límite de 0.05 mg/L. El exceso de Mg posee efectos perjudiciales para la salud humana, puede causar problemas respiratorios, cardiovasculares, hepáticos entre otros.

En la Tabla 3.5 se evidencia la presencia de EPTs tales como el As, Mn, Pb y Fe. Al comprar estos resultados con la línea base establecida en una investigación previa realizada por Jiménez en 2021, se observa un ligero aumento en las concentraciones de estos contaminantes. Este hallazgo subraya la necesidad crítica de abordar el problema de la presencia de EPTs, para salvaguardar la calidad del agua potable. La implementación

urgente de tratamientos eficaces para la remoción de estos contaminantes se presenta como una medida imperativa para garantizar un suministro de agua seguro y proteger la salud y el bienestar de la comunidad.

Tabla 3.5

Resultados de la concentración de EPT presentes en el agua de la quebrada El Panteón en diferentes campañas de muestreo.

Año de monitoreo	As	Pb	Mn	Fe	Lugar de muestreo	Condición meteorológica
2021	0.017	0.004	0.007	0.009	Quebrada	
2023	0.019	0.004	0.057	0.376	el	Estación seca
LMP	0.010	0.010	0.050	1.000	Panteón	

Nota. Unidad de medida mg/L. Se comparan los resultados con el límite máximo permitido por normativa.

3.1.7. Diseño del sistema de electrodiálisis (ED) para remover As del agua.

Tras el análisis de alternativas en el capítulo 2, se concluyó que la tecnología adecuada para la eliminación de As del agua superficial en la cuenca alta del cantón Santa Rosa es la ED. Esta tecnología destacó por su elevado porcentaje de remoción de As, alcanzando valores del 98% y el bajo consumo energético de que osciló entre 0.14 y 1.24 kWh/m³. Además, es una tecnología promisorio por oportunidades de escalabilidad y adaptabilidad lo cual será investigado en este capítulo, convirtiéndola en un sistema que puede ser implementada en comunidades donde los recursos para sistemas convencionales de tratamiento de agua son limitados.

En el capítulo 2, se determinó que el caudal óptimo para el sistema de ED es de 500 ml/min. Al trabajar con caudales inferiores prolongaban el tiempo de remoción del As mientras que caudales superiores generaban resistencia al flujo y resultaban en pérdidas de presión. Con el caudal de 500 mL/min, se observó que no había pérdida de presión, demostrando la capacidad de tratar más agua de manera efectiva. Asimismo, se estableció que el voltaje óptimo de operación era de 6 V requiriendo una energía específica que varió en un rango de 0.26 a 0.43 kWh/m³.

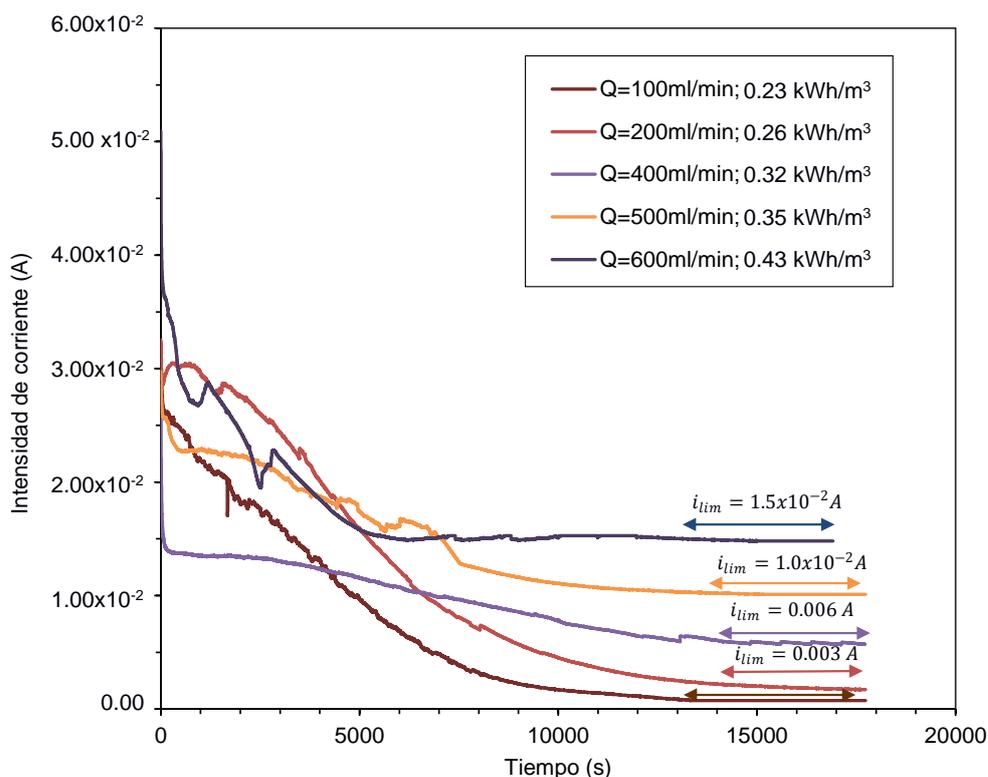
Hasta el momento, se han discutido resultados semi-cuantitativos de los resultados del monitoreo de la zona de estudio. En el presente capítulo se presentarán los resultados de pruebas cuantitativas de remoción de As, para esto, se realizaron ensayos variando el voltaje entre 2, 4, 6 y 8 V, evaluando su incidencia en la energía específica. Además, se variaron los volúmenes entre 1000, 2000, 4000 y 5000 mL para determinar su capacidad para tratar mayor volumen de agua y así evaluando la escalabilidad del sistema de ED.

3.1.7.1.1. Efecto de variación del caudal en el consumo energético

El flujo de caudal impactó en la velocidad de transferencia de masa de iones de As. Caudales elevados pueden generar resistencia al flujo y una distribución no uniforme de corriente, afectando al consumo energético del sistema. Por lo que se evaluó la variación de caudal con respecto al consumo energético. La Figura 3.4 representa la variación de la intensidad de corriente eléctrica en función del tiempo bajo diferentes caudales, y manteniendo un volumen constante de 1000 mL. Cada curva exhibe un patrón de comportamiento de corriente hasta alcanzar la zona de corriente limitante, que corresponde al límite máximo de corriente que el sistema puede suministrar. Este fenómeno se manifiesta debido a la naturaleza del agua, como se observa en Figura 3.4. Al utilizar caudales de 100, 200, 400, 500 y 600 ml/min se obtuvieron valores de corriente limitante de 0.001, 0.003, 0.006, 0.01 y 0.015 A, respectivamente. Este comportamiento indica que a medida que aumenta el caudal, el sistema requiere de una mayor demanda de corriente, lo que se refleja en la zona de corriente limitante del sistema.

Figura 3.4

Influencia de variación del caudal en la intensidad de corriente durante la experimentación



Nota. Condición experimental: volumen = 1000 mL; voltaje de 6 V

Se calculó la energía específica necesaria, expresada en kWh/m³, para determinar el consumo energético, considerando el tiempo de experimentación y la intensidad de corriente promedio. El propósito de aumentar el caudal es la capacidad de tratar una mayor cantidad de agua en el mismo período experimental. Durante los experimentos con diferentes caudales, se observó que todos permitían la eliminación de arsénico del agua, lo que subraya la necesidad de seleccionar un caudal que facilite el tratamiento de volúmenes más grandes de agua. Se verificó que, a medida que aumenta el caudal, la energía específica tiende a incrementarse, y, por ende, el costo energético también aumenta. Sin embargo, este aumento es gradual y no significativo. Por lo tanto, se eligió el caudal óptimo de 500 mL/min, ya que permite tratar un 80% más de volumen que el caudal mínimo de 100 mL/min. Además, su costo energético de \$0.036/m³ sigue estando por debajo del costo de un tratamiento convencional, que es de \$0.38/m³, representando así un ahorro del 90%.

La Tabla 3.6 muestra cómo el incremento del caudal impacta en la energía específica, influyendo así en el costo energético asociado. El caudal de 100 mL/min registró la menor energía específica de 0.23 kWh/m³, al incrementar el caudal a 600 mL/min se observó un aumento en la energía específica, alcanzando un valor de 0.43 kWh/m³. Este aumento del 87% en el consumo de energía señala la influencia significativa del caudal en los requisitos energéticos del sistema. El propósito de aumentar el caudal es la capacidad de tratar una mayor cantidad de agua en el mismo período experimental. Durante los experimentos con diferentes caudales, se observó que todos permitían la eliminación de arsénico del agua, lo que subraya la necesidad de seleccionar un caudal que facilite el tratamiento de volúmenes más grandes de agua. Se verificó que, a medida que aumenta el caudal, la energía específica tiende a incrementarse, y, por ende, el costo energético también aumenta. Sin embargo, este aumento es gradual y no significativo. Por lo tanto, se eligió el caudal óptimo de 500 mL/min, ya que permite tratar un 80% más de volumen que el caudal mínimo de 100 mL/min. Además, su costo energético de \$0.036/m³ sigue estando por debajo del costo de un tratamiento convencional, que es de \$0.38/m³, representando así un ahorro del 90%.

Tabla 3.6

Efecto de la variación de caudal en parámetros de diseño

Caudal [mL/min]	Corriente promedio [A]	Energía específica [kWh/m³]	Costo energético [USD/m³]
100	0.009	0.234	0.022
200	0.010	0.261	0.025
400	0.011	0.319	0.031
500	0.012	0.359	0.036
600	0.014	0.431	0.041

Nota. Condición experimental: volumen 1000 mL; caudal 500 mL/min

3.1.7.1.2. Efecto del voltaje en la remoción de As en el agua tratada.

El sistema de ED produce dos tipos de efluentes: agua tratada, que es libre de contaminantes, y agua de rechazo, que concentra los contaminantes. Los experimentos realizados en este proyecto se llevaron a cabo con un 80% de recuperación de agua tratada, lo que determina el volumen de ambos tipos de efluentes. Por ejemplo, al trabajar con un volumen de 1000 mL y un 80% de recuperación, el volumen de agua tratada sería de 800 mL, mientras que el agua de rechazo sería de 200 mL. Los resultados de remoción de As en el agua tratada permitirán determinar la eficiencia real de remoción del sistema. Por otro lado, los resultados del agua de rechazo se abordarán en la siguiente sección.

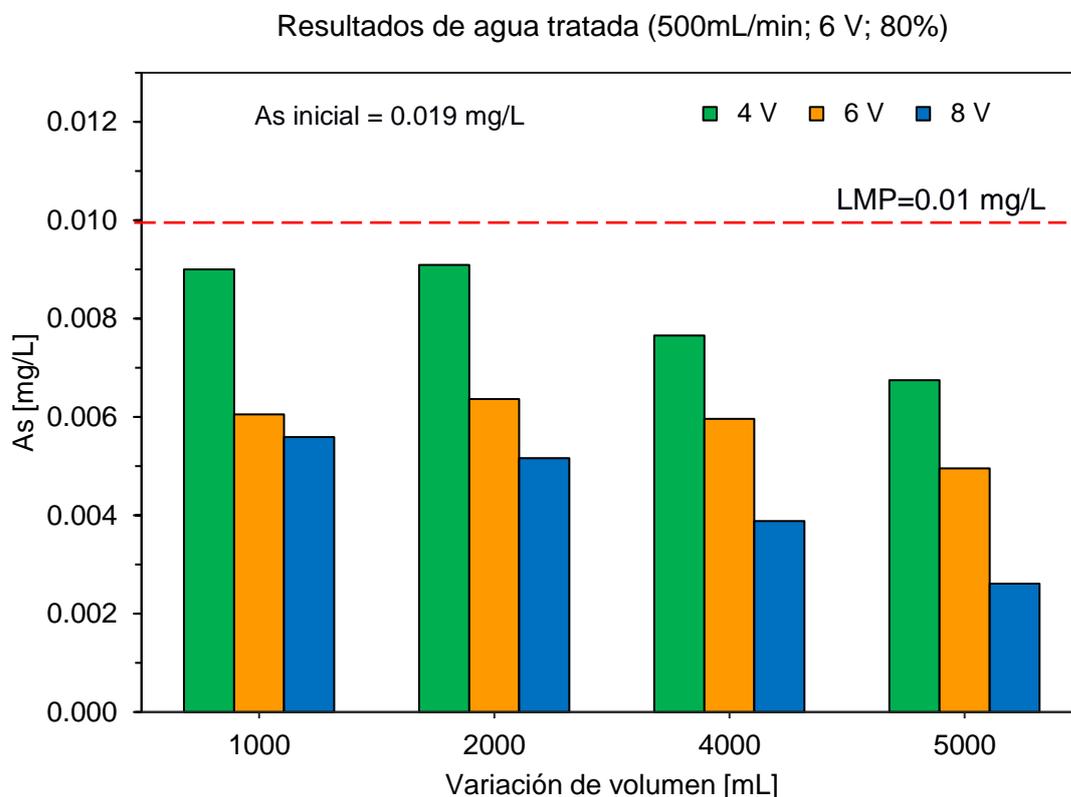
En la Figura 3.5 se destaca que, para las condiciones experimentales de 4, 6 y 8 V; 1000, 2000, 4000, 5000 mL, el sistema de ED remueve de manera eficaz el As presente en el agua, por debajo del límite máximo permitido por normativa (LMP=0.01 mg/L). El agua muestreada en la quebrada El Panteón presentó una concentración de As de 0.019 mg/L, valor que supera el límite máximo establecido, y cuyas concentraciones son perjudiciales para los consumidores.

Los resultados revelaron que el voltaje constituye el parámetro de diseño más influyente en la eliminación de As. Al operar a un voltaje de 4 V, se logró una remoción del 53%, 52%, 60% y 65% para los volúmenes de 1000, 2000, 4000 y 5000 mL, respectivamente. A 6 V, la remoción fue del 68%, 67%, 69% y 75% para los mismos volúmenes, y finalmente, a 8 V se obtuvo una remoción del 71%, 73%, 80% y 86%. Es destacable que el aumento de 2 V, de 6 a 8 V, resultó en un incremento del 13% en la eficiencia. Por lo tanto, los resultados señalan que el aumento tanto del voltaje como del volumen conlleva a una mejora en la remoción de As, alcanzando un máximo del 86.37%. Sin embargo, trabajar con voltajes altos implica un aumento en el consumo energético y, por lo tanto, un aumento en el costo por m³ de agua tratada. Por lo tanto, se elige un voltaje óptimo de 6 V. Con un voltaje de 6 V, se obtuvieron porcentajes de remoción de 68.21%, 66.79%, 68.89% y 74.15% para volúmenes de 1000, 2000, 4000 y 5000 mL, respectivamente, lo cual es favorable, ya que bajo estas

condiciones se puede reducir el costo energético y tratar una mayor cantidad de agua, alcanzando la remoción eficaz del As presente en el agua.

Figura 3.5

Resultados de la variación de voltaje y volumen en el agua tratada.



Nota. La figura muestra la remoción de As del agua bajo diferentes condiciones experimentales

3.1.7.1.3. Efecto del voltaje en la concentración de As en el agua de rechazo

Como se indicó previamente, el sistema de ED genera dos efluentes, siendo uno de ellos el agua concentrada con As. En esta sección, se llevó a cabo la evaluación de la concentración de As en el agua de rechazo. En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se ilustra el comportamiento del agua concentrada con As en función de la variación del voltaje. Los resultados demuestran que, al aplicar voltajes de 4, 6 y 8, se obtuvieron concentraciones de As de 0.015, 0.021 y 0.032 mg/L, respectivamente. Estos hallazgos señalan que existe una relación proporcional entre el voltaje aplicado y la concentración de As en el agua de rechazo, indicando que mayores voltajes resultan en

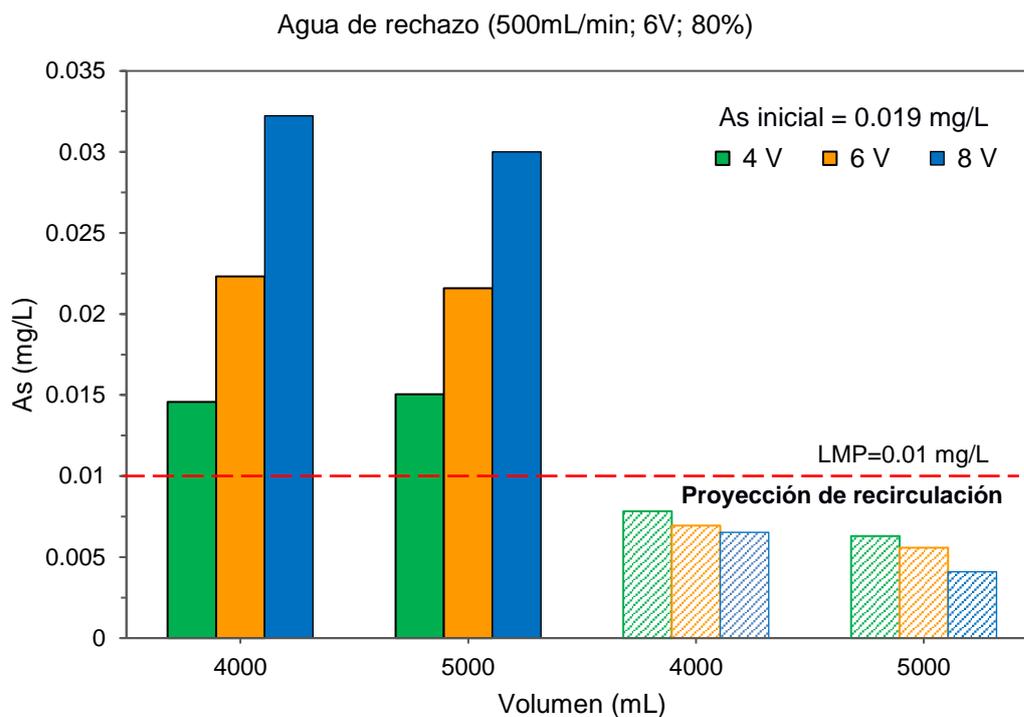
mayores concentraciones de As. Este comportamiento es relevante, ya que el agua concentrada con As debe someterse a un tratamiento posterior antes de ser liberada al medio ambiente, asegurando así que no afecte el bienestar del entorno. Además, la posibilidad de recircular esta agua en el stack para eliminar As y reducir su concentración en el efluente de rechazo representa una estrategia circular. Dada la baja cantidad de energía necesaria para este proceso, se vislumbra como una opción viable. La recirculación en el stack no solo contribuiría a una mayor eficiencia en la remoción de As, sino que también mitigaría la liberación de agua con elevadas concentraciones de As en el efluente de rechazo, fortaleciendo así la sostenibilidad y la eficacia del sistema de tratamiento.

Tras evaluar el efecto de la variación del voltaje sobre la concentración de As tanto en el agua tratada como en el rechazo se determinó que el voltaje óptimo para la eliminación efectiva de As es de 6 V, ya que permite la eliminación eficiente del contaminante con una eficiencia de 74.15% y además, evita la generación de agua con concentraciones elevadas de As. Al emplear un voltaje de 6 V, se observa que la concentración de As en el agua de rechazo aumenta en un 14%, pasando de 0.019 mg/L a 0.022 mg/L. No obstante, se plantea la viabilidad de implementar una estrategia de recirculación del agua de rechazo con un 80% de recuperación. De esta manera, se lograría reducir las concentraciones por debajo del LMP establecido en 0.010 mg/L. Este enfoque presenta un potencial para mejorar la eficiencia del sistema y cumplir con los estándares de calidad establecidos.

En la Figura 3.6 se presentan las proyecciones de la recirculación del agua de rechazo, basadas en los porcentajes de remoción discutidos anteriormente. Estos resultados resaltan que, al recircular el agua de rechazo a través del stack de ED, se consigue eliminar el As presente, logrando concentraciones por debajo del LMP establecido en 0.010 mg/L. Esta estrategia emerge como una medida efectiva para asegurar los estándares de calidad del agua y potenciar la eficiencia del sistema de tratamiento.

Figura 3.6

Resultados de la variación de voltaje y volumen en el agua de rechazo



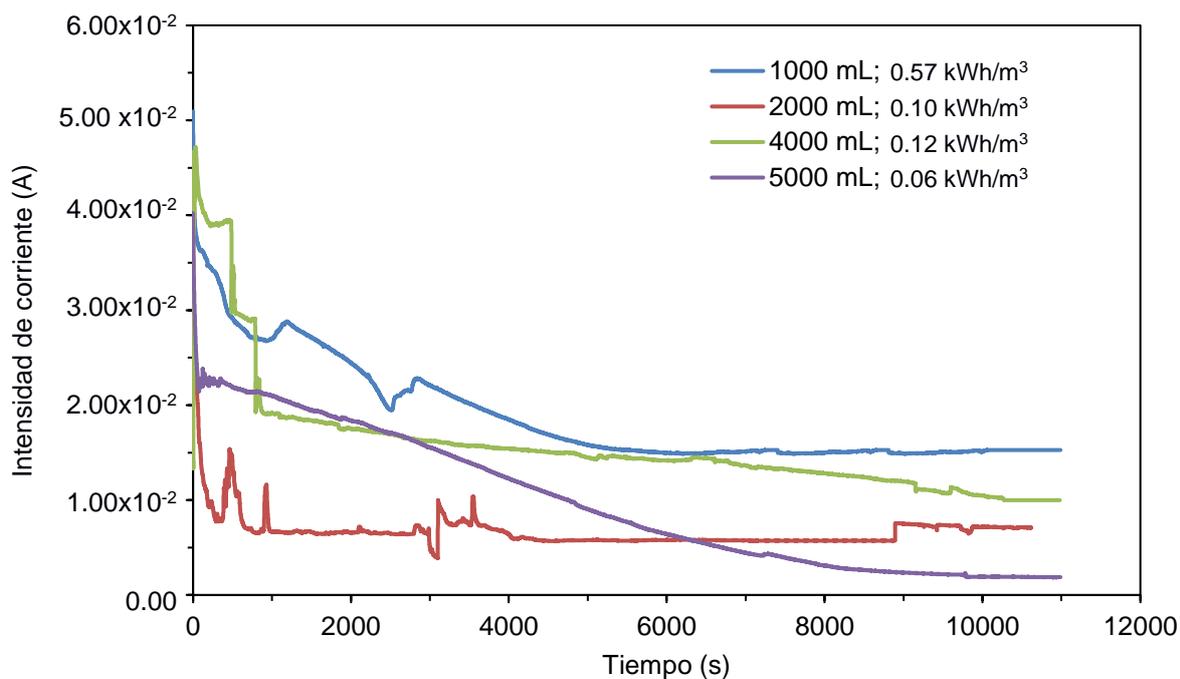
Nota. La figura muestra la concentración de As en el agua de rechazo, y la proyección de recirculación del agua de rechazo para disminuir la concentración de As.

3.1.7.1.4. Escalabilidad del volumen en el sistema de ED

Para determinar la escalabilidad del sistema se incrementó el volumen tratado y analizó el efecto de la variación de volumen desde 1000, 2000, 4000, hasta 5000 mL manteniendo condiciones de experimentación de $Q = 500$ mL/min y un voltaje aplicado de 6 V. En la Figura 3.7 se observó que el aumento del volumen de agua a tratar no influye en el comportamiento de la curva de intensidad de corriente eléctrica versus el tiempo. Por ejemplo, en el tiempo $t=0$, la curva exhibe un pico de intensidad de corriente máximo. A medida que transcurre el tiempo, se observó una disminución gradual de la intensidad de corriente, indicando una reducción progresiva en el flujo de corriente eléctrica. Esta disminución continúa hasta alcanzar un punto de estabilización, donde la intensidad de corriente se mantiene constante. Este estado estabilizado sugiere que el sistema ha alcanzado un equilibrio dinámico, y la corriente eléctrica fluye de manera constante a través del circuito.

Figura 3.7

Efecto de variación del volumen en la intensidad de corriente durante la experimentación



Nota. La figura muestra la variación de intensidad de corriente en función del tiempo

Se determinó la energía específica para cada uno de los ensayos; para el ensayo con un volumen de 5 L se evidenció la menor energía específica de 0.059 kWh/m³. En contraste, el volumen de 1 L presentó el mayor consumo energético, alcanzando 0.57 kWh/m³. Los volúmenes intermedios de 2 y 4 L mostraron consumos similares de energía específica, registrando 0.10 y 0.12 kWh/m³ respectivamente. Estos resultados demuestran una tendencia, a medida que se incrementa la cantidad de agua tratada, el consumo energético disminuye, mientras que volúmenes menores conllevan un mayor consumo energético. Este patrón sugiere que tratar volúmenes mayores favorece una distribución uniforme de la corriente eléctrica, lo que conduce a una mayor eficiencia energética en el proceso de ED.

En la Tabla 3.7 se detallan los resultados energéticos de la variación de volúmenes, resaltando que el volumen óptimo es de 5000 mL, exhibiendo el menor consumo energético de 0.059 kWh/m³ y, por ende, el menor costo energético de 0.006 USD/ m³. Estos resultados son prometedores, ya que, a nivel de escalabilidad, el sistema mostró un menor consumo energético al aumentar el volumen de agua tratada.

Tabla 3.7*Efecto de la variación de volumen en parámetros de diseño*

Volumen [mL]	Corriente promedio [A]	Energía específica [kWh/m³]	Costo energético [USD/m³]
1000	0.019	0.566	0.054
2000	0.007	0.101	0.010
4000	0.016	0.119	0.011
5000	0.010	0.059	0.006

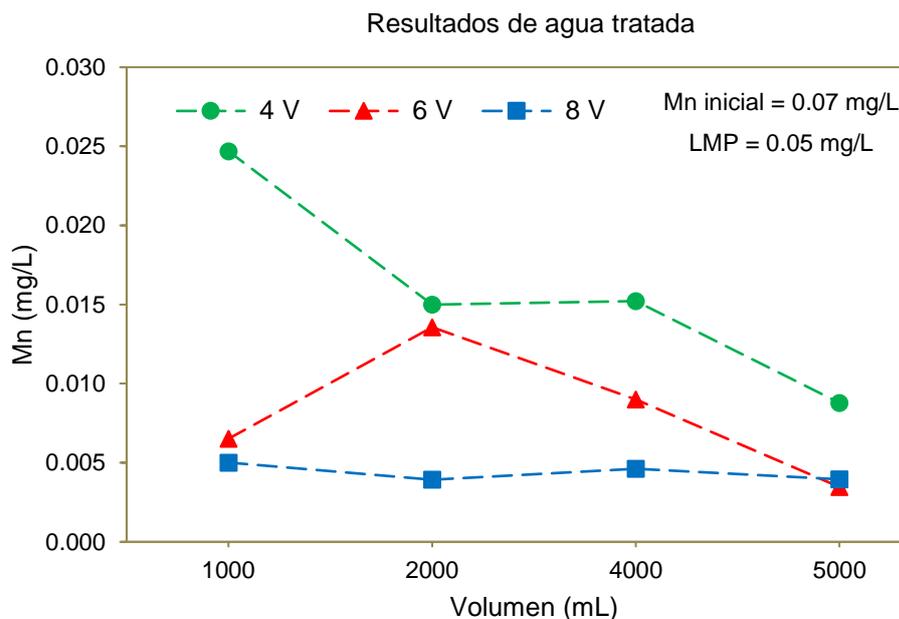
Nota. Se detalla el efecto del volumen sobre la corriente promedio, energía específica y el costo energético.

3.1.7.1.5. Eficiencia de remoción de elementos potencialmente tóxicos.

En el agua muestreada en la quebrada El Panteón, se detectó la presencia de Mn, con una concentración de 0.07 mg/L que superó el límite máximo permitido de 0.05 mg/L para agua potable. Por lo que se experimentó con el sistema de ED para remoción de Mn. Figura 3.8 ilustra la eficiencia de remoción del sistema al variar voltajes de 4, 6 y 8 V, y volúmenes de 1000, 2000, 4000 y 5000 mL bajo un caudal constante de 500 mL/min. Al aumentar el volumen de 1000 a 5000 mL se registraron remociones de 83 y 92%, lo cual indica que al trabajar con volúmenes mayores se alcanza una mayor remoción. Por lo que se determinó que el volumen óptimo para el sistema es de 5000 mL, ya que permite tratar una mayor cantidad de agua. En relación con los voltajes, se logró una remoción del 77%, 87% y 94% con 4, 6 y 8 V respectivamente. Sin embargo, es importante destacar que el Mn mostró una eficiente eliminación con voltajes de 6 y 8 V, alcanzando concentraciones de 0.003 y 0.004 mg/L respectivamente. No obstante, al aumentar 2 V adicionales (es decir, 8 V), la remoción de Mn es marginal en comparación con los 6 V. Por lo tanto, se considera que el voltaje óptimo es de 6 V, logrando así la eliminación del manganeso con un menor consumo energético.

Figura 3.8

Efecto de variación de volumen y voltaje sobre la eficiencia del sistema de ED en la remoción del Mn.



Nota. La figura muestra la remoción del Mn bajo la variación de volumen y voltaje.

3.1.7.1.6. Remoción de elementos potencialmente tóxicos (ETP)

Se analizó la presencia de otros EPT como: Fe, Cu, Pb, Ni, Co, Cr, y el compuesto CN_{total} en el agua muestreada de la quebrada El Panteón, de los cuales no se detectó Co, Cr y CN_{total} . En la Tabla 3.8, se detallan las concentraciones iniciales de los EPT y el LMP establecido por la normativa. Las concentraciones para los EPT Fe, Cu, Pb y Ni fueron de 0.664, 0.065, 0.004 y 0.008 mg/L, respectivamente. Estos resultados son destacados dado que las concentraciones de los EPT se encuentran por debajo de los LMP establecidos, los cuales son de 1.00, 2.00, 0.01 y 0.07 para Fe, Cu, Pb y Ni, respectivamente. A pesar de cumplir con los estándares, se procedió a examinar la eficiencia de remoción de estos contaminantes mediante el sistema de ED. Esta decisión se tomó con el objetivo de conocer el porcentaje de remoción y establecer un precedente de lo que puede lograr esta tecnología.

Tabla 3.8

Concentración inicial de EPT encontrados en la muestra de agua de la quebrada El Panteón. LMP establecido por la normativa

EPT	Fe	Cu	Pb	Ni
Concentración inicial	0.664	0.065	0.004	0.008
LMP	1.00	2.00	0.01	0.07

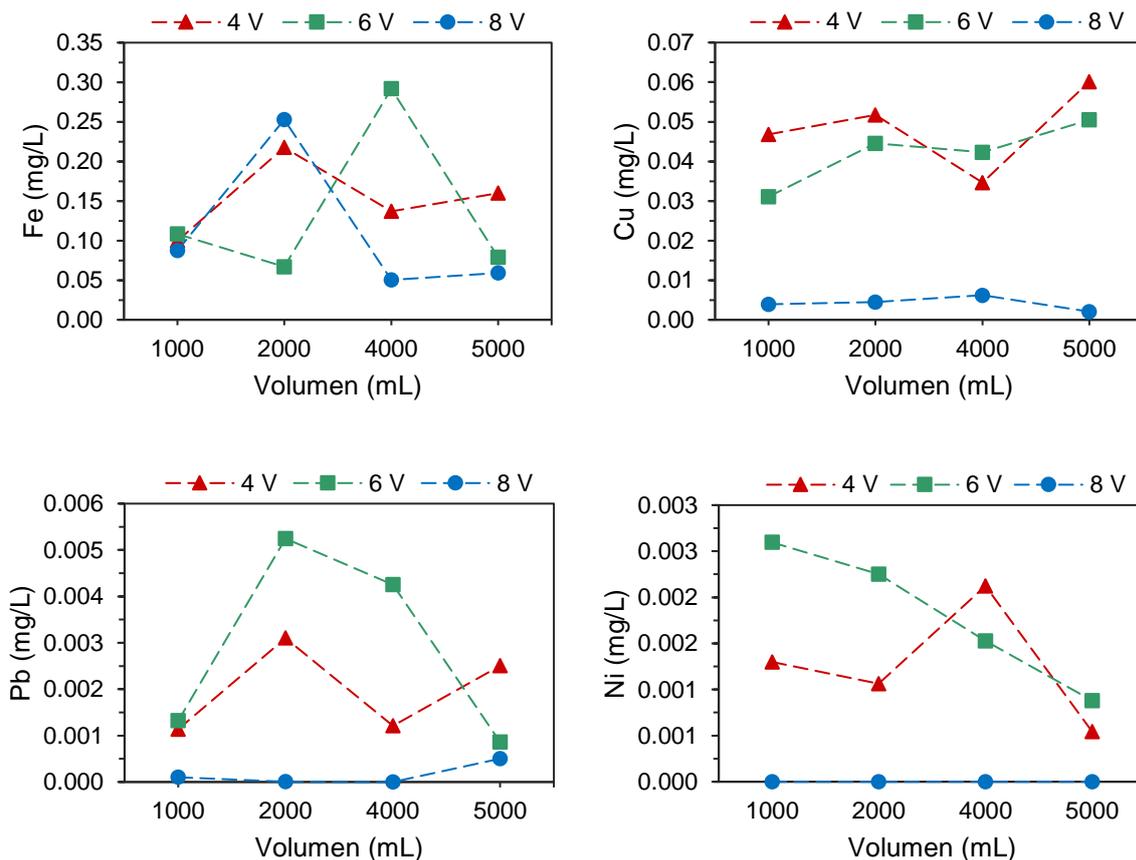
Nota. Unidad de medida mg/L

Por otro lado, en la Figura 3.9 se presentan los resultados de la remoción de los EPT mediante el sistema de ED, al realizar experimentos con volúmenes de 1000, 2000, 4000 y 5000 mL, y voltajes de 4, 6 y 8 V. El EPT con mayor concentración fue el Fe, con una concentración inicial de 0.66 mg/L. A través del sistema de ED, se logró la remoción, alcanzando un valor de 0.10 mg/L con un voltaje de 4 V y un volumen de 1000 mL. Sin embargo, al variar el volumen (1000, 2000, 4000, 5000 mL), no se observa una influencia significativa en la remoción del Fe, mientras que el aumento del voltaje sí tiene un impacto significativo. Al aumentar los voltajes a 6 y 8 V, la concentración del Fe fue de 0.079 y 0.059, respectivamente. El Cu cuya concentración inicial fue de 0.065 al variar los voltajes se obtuvieron concentraciones finales entre 0.035-0.060 mg/L para 4 V, 0.031-0.050 mg/L para 6 V y 0.002-0.006 mg/L para 8 V.

Así mismo para el Pb se evidencia mayor remoción al aumentar el voltaje, las concentraciones finales después de circular el agua a través del sistema de ED se encontró entre 0.001-0.003 mg/L para 4 V, 0.001-0.005 mg/L para 6 V, y 0.000-0.001 mg/L para 8 V. Por último, el Ni tiene una concentración inicial baja en comparación con los otros EPT de 0.008 mg/L, que por medio del sistema de ED se alcanzó una concentración final de 0.0005-0.001 para 4 V, 0.0008-0.0026 mg/L para 6 V y para el voltaje de 8 V ya no se detectó la presencia del Pb en el agua tratada. Los resultados indican que la eficiencia en la remoción de contaminantes aumenta proporcionalmente al incrementar el voltaje en el sistema.

Figura 3.9

Remoción de EPT encontrados en el agua muestreada en la quebrada El Panteón. Efecto de la variación del voltaje y volumen.



Nota. Efecto de la variación del volumen y voltaje en la remoción de EPT: Fe, Cu, Pb y Ni.

3.1.7.1.7. Desafíos experimentales por turbidez

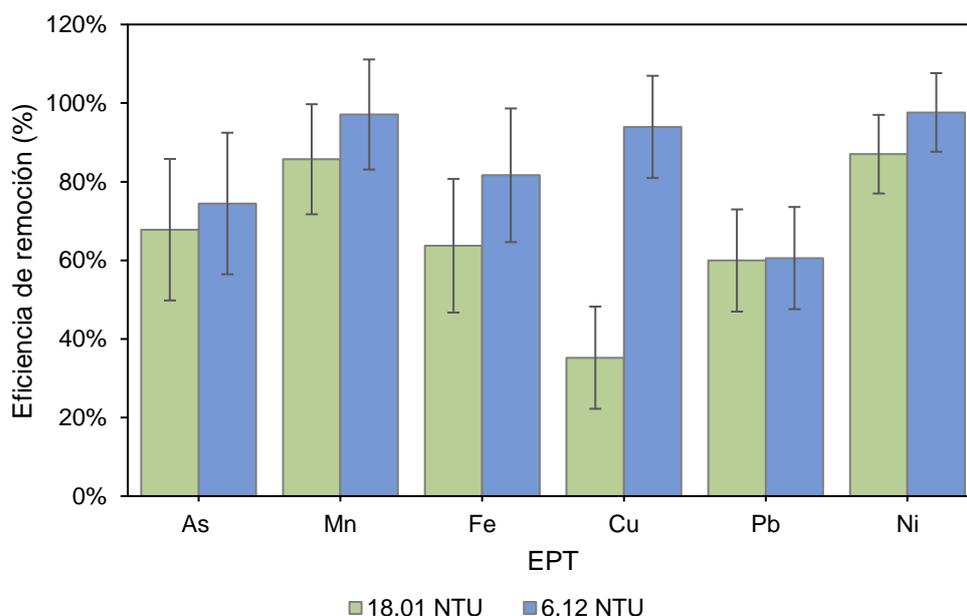
La turbidez en el agua, causada por la presencia de partículas suspendidas, puede tener un impacto significativo en el sistema de ED destinado a la remoción As. Estas partículas pueden afectar el rendimiento de las membranas utilizadas en el sistema, ya que su presencia puede obstruir los poros de las membranas, reduciendo así la eficiencia de transporte iónico y la capacidad de remoción de As. En el marco experimental, se observó cómo variaciones en la turbidez del agua de alimentación afectaron directamente la eficiencia de remoción de As, destacando la importancia de considerar y gestionar la turbidez como un factor clave en el diseño y operación de sistemas de ED para garantizar un rendimiento óptimo en la remoción de EPT.

En la Figura 3.10 se presentan los resultados de eficiencia de remoción del sistema, evidenciando la notable influencia de la turbidez en su desempeño. Se observa que, con una turbidez de 18.01 NTU, el sistema alcanzó eficiencias de remoción del 68%, 86%, 64%, 35%, 60%, y 87% para los contaminantes As, Mn, Fe, Cu, Pb y Ni, respectivamente. En contraste, para el agua con una turbidez de 6.01 NTU, la eficiencia del sistema experimentó un aumento significativo, llegando a 74%, 97%, 82%, 94%, 61%, y 98% para los mismos contaminantes. Estos resultados resaltan cómo el incremento de la turbidez puede afectar considerablemente la capacidad del sistema de ED para remover eficazmente los contaminantes, subrayando la importancia de considerar este factor al evaluar su rendimiento. Este fenómeno podría atribuirse al impacto de la turbidez en situaciones donde las cantidades de sedimentos suspendidos son más elevadas, y las concentraciones de EPT son más bajas, es probable que estos elementos se encuentren en mayor medida en la fase de partículas en suspensión en lugar de estar disueltos en el agua, afectando así su eliminación eficiente.

Sin embargo, a pesar de que se observa un aumento en la eficiencia de remoción del EPT al disminuir el nivel de turbidez en el agua, para el caso del Pb solo se registra un aumento del 1% en su eficiencia de remoción. Esto se atribuye a la baja concentración inicial de 0.004 mg/L, lo que sugiere que la eficiencia de remoción está influenciada por las concentraciones iniciales del EPT.

Figura 3.10

Eficiencia de remoción del sistema de ED bajo diferentes niveles de turbidez



Nota. Eficiencia de remoción de diferentes EPT con niveles de turbidez de 18.01 y 6.12 NTU

Otro factor que incide en la eliminación de contaminantes del sistema es el desgaste natural de las membranas debido a su uso. En la Tabla 3.9 se presentan las condiciones iniciales y finales de las membranas empleadas en el proceso experimental, utilizando agua muestreada de la quebrada El Panteón con niveles de turbidez de 6.12 y 18.01 NTU. Es destacable que, tanto en las membranas AEM como en las CEM, el estado final exhibe una capa de color amarillo-naranja, resultado del intercambio iónico en la superficie de la membrana y de las partículas coloidales presentes en el agua. Sin embargo, la membrana AEM presenta una mayor intensidad de color en los diferentes niveles de turbidez. Esto indica una mayor presencia de partículas coloidales de carácter negativo, dado que la membrana AEM tiene afinidad a permitir el paso a iones electronegativos.

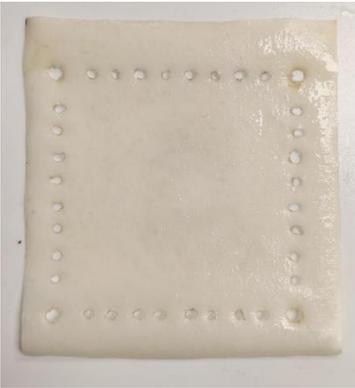
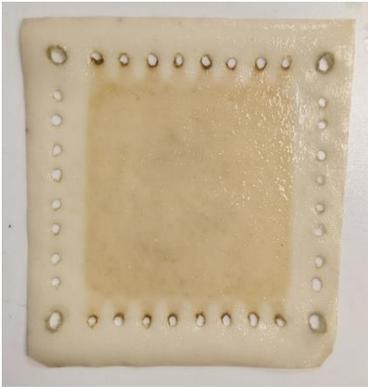
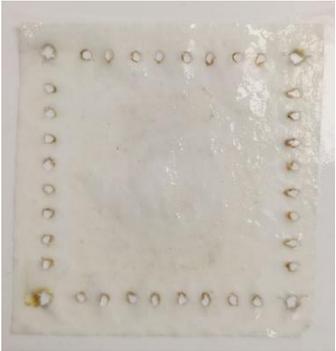
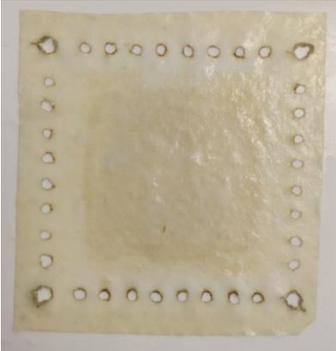
La presencia de partículas coloidales afecta la perm-selectividad de la membrana, que se refiere a su capacidad para seleccionar y permitir el transporte de ciertos iones a través de ella, al mismo tiempo que excluye o limita la entrada de otros iones. Una alta perm-selectividad indica que la membrana favorece el paso de ciertos iones, mientras que

una baja perm-selectividad podría traducirse en una menor eficiencia en la separación iónica. Por lo tanto, se puede concluir que el estado final de la membrana presenta una perm-selectividad inferior a la membrana en su estado inicial.

Dada la influencia significativa de las partículas coloidales en la eficiencia de remoción de EPT en el agua, se plantea como solución potencial la implementación de un sistema de filtrado como pretratamiento. Este enfoque tiene como objetivo reducir el nivel de turbidez en el agua, tema que será abordado en la siguiente sección.

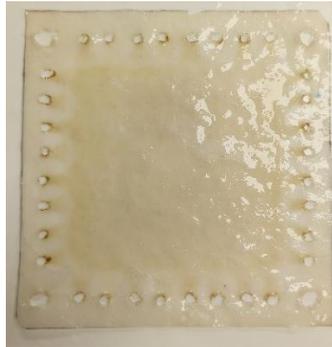
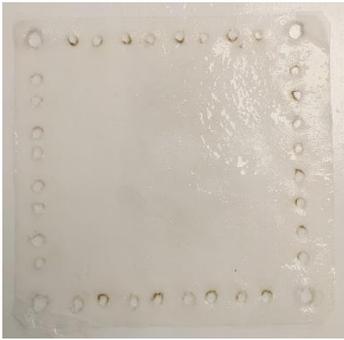
Tabla 3.9

Estado de membranas de intercambio iónico usadas en el sistema de ED

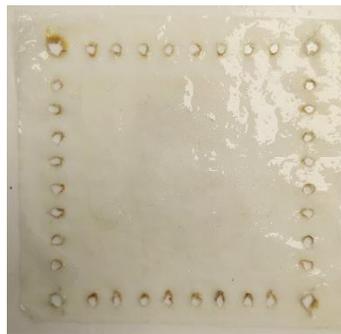
Estado inicial	Estado final
18.01 NTU	
Membranas AEM	
	
Membranas CEM	
	

6.12 NTU

Membranas AEM



Membranas CEM



3.1.8. Diseño de sistemas de pretratamiento y postratamiento.

Para el diseño de los sistemas de pretratamiento y postratamiento se siguió la normativa de Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS) y CPE INEN 5 Parte 9-1.

3.1.8.1. Sistema de pretratamiento.

Se diseñó un sistema de filtración como parte del pretratamiento para separar impurezas suspendidas y partículas coloidales del agua. La presencia de estas partículas constituye un riesgo para la eficiencia de las membranas en el sistema de ED. La presencia elevada de sólidos en suspensión podría obstruir y dañar las membranas, afectando de manera negativa su rendimiento y acortando su vida útil. Este método de tratamiento ofrece beneficios significativos en términos físicos, químicos y bacteriológicos, sin la necesidad de emplear productos químicos adicionales. La operación de este sistema es sencilla y

eficiente, lo que facilita su implementación y mantenimiento. Además, su enfoque económico lo convierte en una opción rentable para el mejoramiento del agua, asegurando un proceso eficaz que resulta beneficioso tanto para la salud pública como para el entorno ambiental.

Se diseñó un sistema de filtro lento con flujo descendente que un lecho de arena filtrante que descansa sobre grava, un sistema de drenaje para la recolección del agua tratada, y dispositivos para regulación y control del filtro. Las características de la arena se encuentran en la Tabla 3.10

Tabla 3.10

Característica del lecho filtrante (arena)

Tamaño efectivo	0.15 a 0.35 mm
Coefficiente de uniformidad	1.5 a 3
Dureza	7 (escala de Mohr)
Solubilidad al HCl	< 5%

Nota. Muestra los parámetros del tipo de arena que se utilizó para el diseño

3.1.8.1.1. Dimensionamiento de filtro lento de arena

Parámetros de diseño

Tasa de filtración: 200 m³/m²/día

QMD: 26 L/s

QMD: 2264 m³/día

Área de filtro

$$A = \frac{\textit{Tasa de filtración}}{\textit{Caudal}}$$

$$A = \frac{200 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{día}}{2264 \text{ m}^3/\text{día}}$$

$$A = 11.32 \text{ m}^2$$

Dimensiones del filtro

Se consideró una relación de 3:1 de largo y ancho

$$ancho = \sqrt{\frac{A}{3}} = \sqrt{\frac{11.32}{3}} = 1.94 \text{ m}$$

$$largo = ancho * 3 = 5.83 \text{ m}$$

Se propusieron nuevas dimensiones y se establece una nueva área

$$A = ancho * largo$$

$$A = 2 * 6 = 12 \text{ m}^2$$

Profundidad de la caja de filtro

Profundidad de la grava: 0.5 – 0.8 m

Profundidad de arena: 1.0 – 1.5 m

Profundidad máxima de agua 1 – 3 m

Profundidad entre el techo y el agua 0.3 m

Profundidad útil:

$$P_{\text{útil}} = 0.5 + 1.2 + 1.3 + 0.2 = 3.2 \text{ m}$$

Para determinar la profundidad total se consideró un factor de seguridad de 1.10 como prevención a cualquier falla del sistema de filtración:

$$P_{\text{total}} = 1.1 * P_{\text{útil}} = 3.5 \text{ m}$$

Se determinaron la distancia de canaletas de lavado

$$distancia_c = \frac{L}{N_c} = \frac{6}{2} = 3 \text{ m}$$

Caudal de lavado

Velocidad de lavado 0.1 m/h

$$Q_l = V_l * A$$

$$Q_l = 0.017 \text{ m/s} * 12 \text{ m}^2$$

$$Q_l = 0.204 \text{ m}^3/\text{s}$$

Caudal de canaleta

$$Q_c = \frac{Q_l}{N_c}$$

$$Q_c = \frac{0.204}{2}$$

$$Q_c = 0.102 \text{ m}^3/\text{s}$$

Para el volumen de agua de lavado y filtros se consideró un tiempo de 45 min

$$V_l = Q_l * T_l$$

$$V_l = 0.204 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} * 45 \text{ min} * \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}}$$

$$V_l = 550.8 \text{ m}^3$$

Volumen de agua filtrada en 48 horas

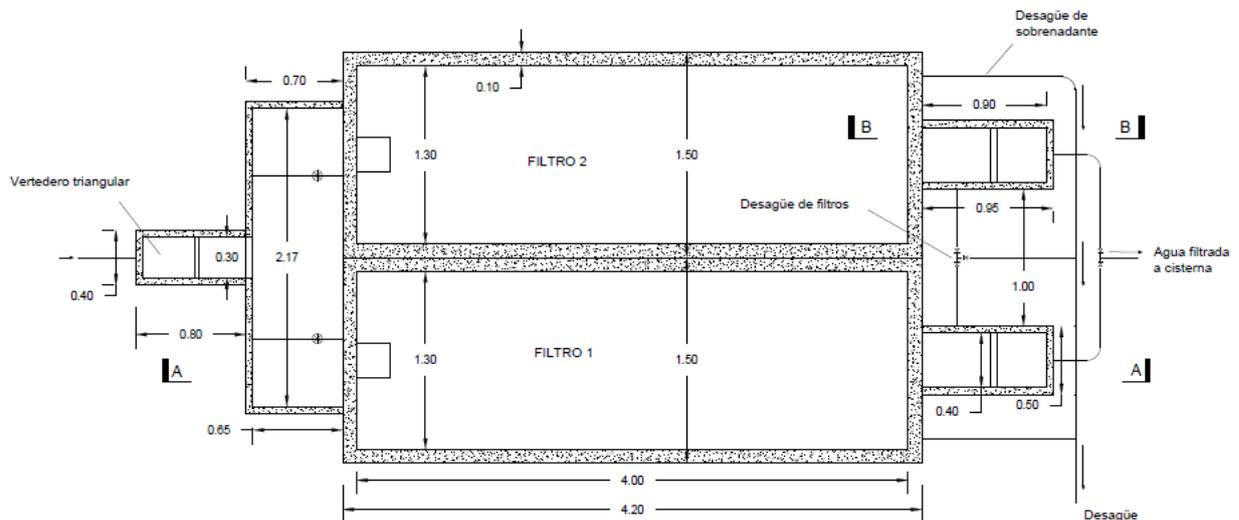
$$V_f = QMD * T_f$$

$$V_f = 2264 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} * \frac{1 \text{ día}}{24 \text{ h}} * 48 \text{ h}$$

$$V_f = 4528 \text{ m}^3$$

Figura 3.11

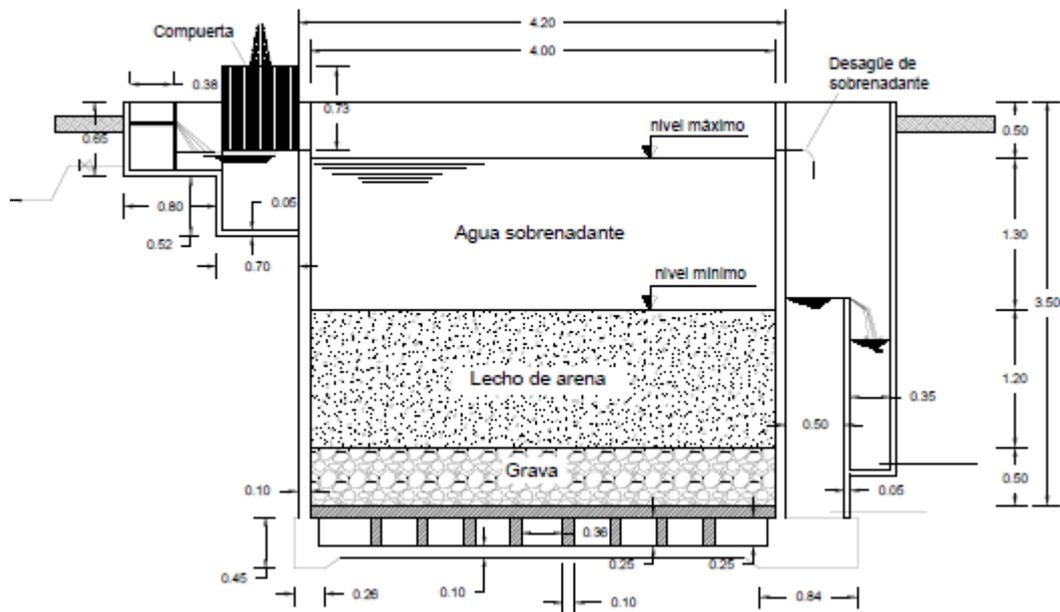
Sistema de pretratamiento para disminuir la turbidez del agua



Nota. Vista en planta

Figura 3.12

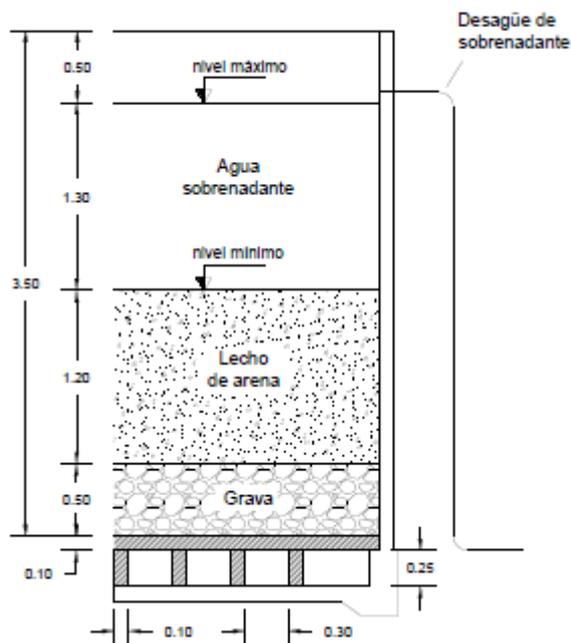
Sistema de ingreso y salida al filtro lento de arena



Nota. Corte A-A

Figura 3.13

Sistema de desagüe



Nota. Corte B-B

3.1.8.1.2. Dimensionamiento de un tanque de regulación

Los depósitos de regulación permiten el almacenamiento de agua potable en los sistemas de distribución y buscan reducir costos energéticos asociados al bombeo. En este contexto, el enfoque se centra en operar las bombas de manera continua durante períodos en los que la energía es más económica, permitiendo el llenado del depósito con un volumen estratégico que considere la regulación, reserva y el suministro actual de agua. Esta estrategia contribuye a nivelar la demanda de agua, evitando caudales impulsados excesivos por bombas durante las 24 horas. Al no bombear de manera constante, se logra un caudal impulsado más cercano al caudal medio demandado, permitiendo reducir el diámetro de la conducción de entrada, optimizando así la eficiencia del sistema y mejorando su gestión energética. Para el dimensionamiento del tanque de regulación se deben determinar los volúmenes de almacenamiento que se presentan a continuación

Volumen de regulación

El diseño establecido es para una población de 5000 habitantes por lo que se tomó un volumen de regulación del 25% del volumen consumido en un día, considerando la demanda diaria al final del período de diseño.

$$V_r = 0.25 * QMD * 86.4 \text{ m}^3/\text{día}$$

$$V_r = 0.25 * 20 \text{ L/s} * 86.4 \text{ m}^3/\text{día}$$

$$V_r = 428 \text{ m}^3$$

Volumen contra incendios

Para poblaciones de 5000 habitantes se aplica la siguiente fórmula

$$V_i = 50 * \sqrt{P}$$

Donde P es el número de habitantes

$$V_i = 50 * \sqrt{7131}$$

$$V_i = 134 \text{ m}^3$$

Volumen de emergencia

Para una población de 5000 habitantes, se destina el 25% del volumen de regulación como reserva para hacer frente a posibles situaciones de emergencia

$$V_e = 25\% * V_r$$

$$V_e = 25\% * 428 \text{ m}^3$$

$$V_e = 107 \text{ m}^3$$

Volumen para la planta de tratamiento

El volumen para la planta de tratamiento es calculado para el mantenimiento de limpieza que se debe realizar a la misma planta. Este volumen depende del caudal medio y el número de horas para el mantenimiento.

$$V_p = \frac{Q_m}{1000 * 3600} * t$$

$$V_p = \frac{20}{1000 * 3600} * 2$$

$$V_p = 143 \text{ m}^3$$

Volumen de reserva

El volumen total de almacenamiento se realizó mediante la suma de los volúmenes correspondientes a la regulación, reserva para situaciones de emergencia, el almacenamiento para incendios y el volumen asociado a la planta de tratamiento.

$$V_{reserva} = V_r + V_i + V_e + V_p$$

$$V_{reserva} = 428 \text{ m}^3 + 134 \text{ m}^3 + 107 \text{ m}^3 + 143 \text{ m}^3$$

$$V_{reserva} = 811 \text{ m}^3$$

Dimensión del tanque de regulación

Para la construcción del tanque de concreto reforzado, se obtuvo la dimensión del volumen de 811 m³, se propuso diseñar 2 tanques de almacenamiento que cubran ese volumen con el propósito de realizar mantenimientos, y el sistema de distribución de agua potable para la

comunidad no se vea interrumpida. Por lo que las dimensiones del tanque de almacenamiento se muestran en la *Tabla 3.11*

Tabla 3.11

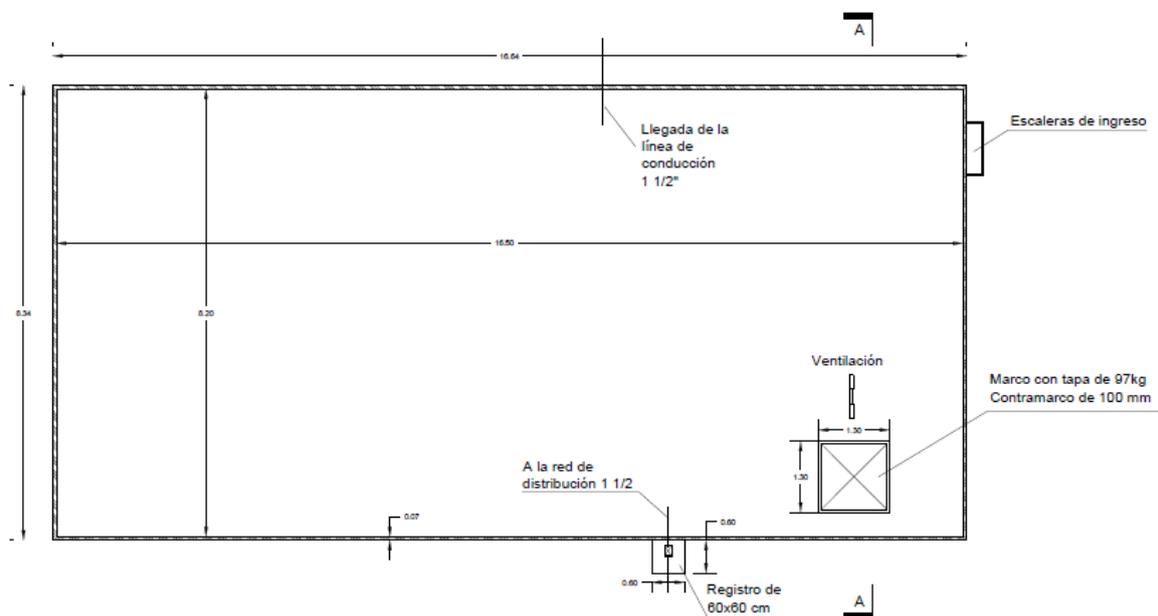
Dimensiones del tanque de regulación

Ancho [m]	8.2
Largo [m]	16.5
Altura [m]	3
Volumen [m³]	406

Nota. Tanque de regulación permite almacenar el volumen de agua tratada

Figura 3.14

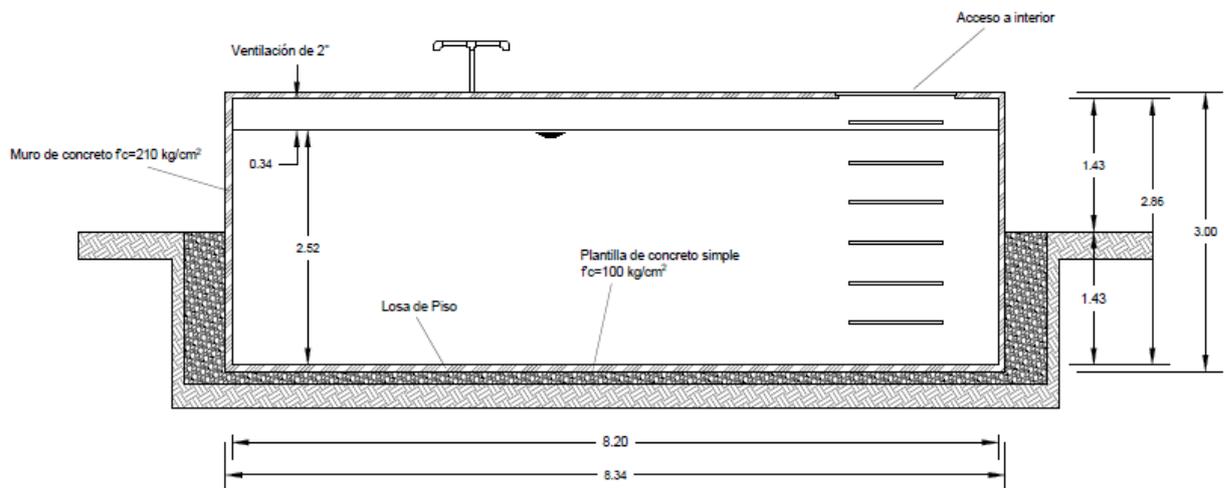
Tanque de regulación para agua potable



Nota. Vista en planta

Figura 3.15

Interior del tanque de regulación



Nota. Corte A-A

3.1.8.2. Sistema de postratamiento.

La implementación de un sistema de piscina de postratamiento para el almacenamiento de agua concentrada de As, seguido de la inyección controlado en formaciones geológicas, representa una estrategia integra para gestionar de manera seguro los efluentes contaminados. Después del tratamiento de ED para la remoción de As, este proceso genera dos efluentes: uno libre de As y otro con concentraciones elevadas del mismo. Este último efluente se almacenará de manera temporal en la piscina de postratamiento, lo que permite el monitoreo continuo de la calidad antes de su disposición final en formaciones geológicas seleccionadas.

La inyección controlada en formaciones geológicas se presenta como una estrategia segura para la disposición final de estos efluentes. Este método implica la introducción gradual calculada de agua tratada en estructuras geológicas subterráneas, como acuíferos o formaciones rocosas permeables. Estos entornos subterráneos actúan como depósitos naturales, donde el agua tratada con As puede dispersarse y diluirse de manera segura, minimizando así el impacto ambiental.

Este enfoque no solo cumple con las normativas ambientales, sino que también aborda la necesidad de una gestión responsable de los residuos contaminados. La implementación de un sistema de este tipo requiere de una planificación, monitoreo constante con la finalidad de proteger la salud pública y preservar la integridad del ecosistema local. De esta manera, se contribuye de manera efectiva a cumplir con los ODS 6 y 11, que se centran en agua limpia y saneamiento, así como en ciudades y comunidades sostenibles.

3.1.8.2.1. Dimensionamiento de piscina de postratamiento

Se calculó el caudal de rechazo, a partir del cual se determinó el volumen diario de agua concentrada de As que sería almacenada. El caudal de rechazo se determinó restando el porcentaje de recuperación de agua tratada al porcentaje de agua concentrada.

$$Q_{entrada} = \frac{Q_{MD}}{\%Rec}$$

$$Q_{entrada} = \frac{26}{0.70} = 37.14 \text{ L/s}$$

$$Q_{entrada} = 3209 \text{ m}^3/\text{día}$$

$$Q_{rechazo} = Q_{entrada} * (1 - \%Rec)$$

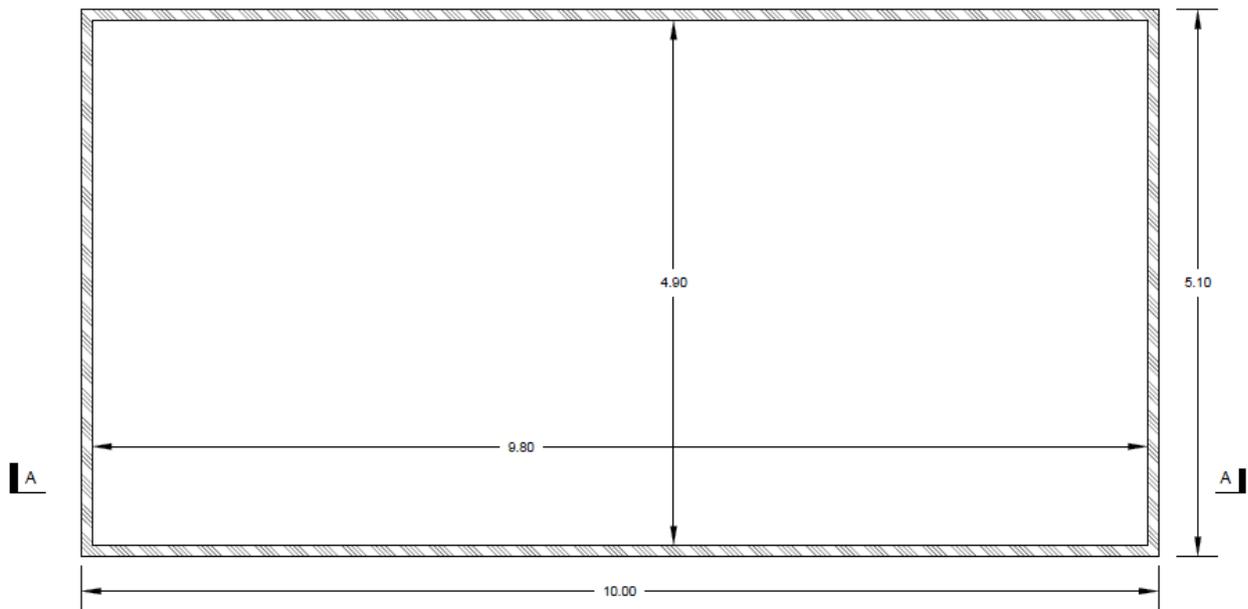
$$Q_{rechazo} = 3209 * (1 - 0.7) = 962.7 \text{ m}^3/\text{día}$$

$$V_{rechazo} = Q_{rechazo} * t$$

$$V_{rechazo} = 963 \text{ m}^3/\text{día} * 1 \text{ día} = 963 \text{ m}^3$$

Figura 3.16

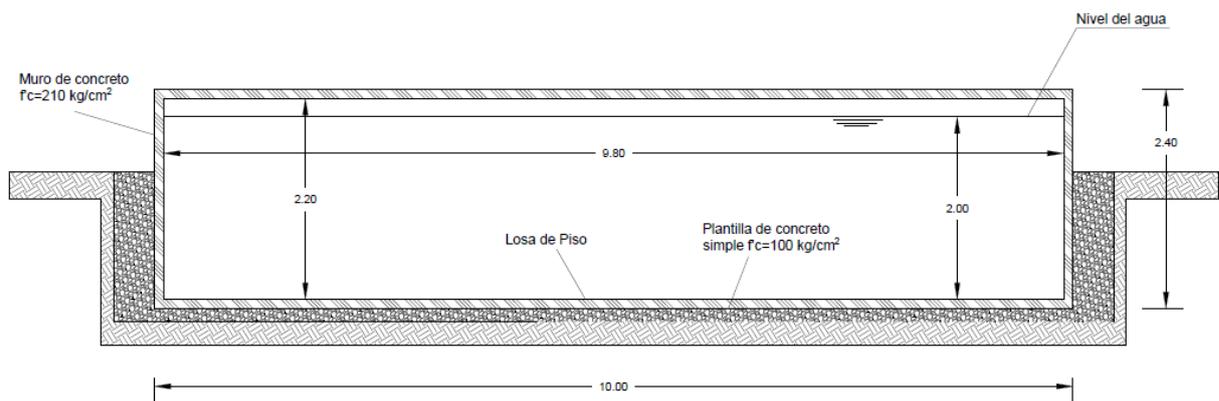
Piscina de postratamiento para agua concentrada de As



Nota. Vista en planta

Figura 3.17

Interior de la piscina de postratamiento para agua concentrada de As



Nota. Corte A-A

3.2 *Especificaciones técnicas*

Las especificaciones técnicas constituyen un conjunto detallado de requisitos y características que establecen la forma en que deben llevarse a cabo la ejecución, construcción e instalación de los diversos componentes del proyecto. En la Tabla 3.12 se detallan los diversos parámetros considerados para la implementación de un sistema de tratamiento avanzado destinado a la remoción de As en el agua. Para cada uno de estos componentes, se incluye una descripción del proceso, detalles constructivos, identificación de materiales y equipos, así como información sobre medición y pago. Este apartado se encuentra detallado en “Anexo A: Especificaciones técnicas”.

Tabla 3.12

Actividades y componentes base para el desarrollo de la implementación de un sistema de tratamiento avanzado de agua para la remoción de As del agua

Código	Especificaciones técnicas
001	Limpieza de terreno
002	Replanteo y nivelación de terreno
003	Movimiento de tierra
004	Geotecnia y estudios de suelo
005	Cimentación y estructura principal
006	Desalojo de material
007	Sistema de captación
008	Acero de refuerzo
009	Hormigón
010	Instalación de tuberías
011	Sistema de bombeo
012	Sistema de electrodiálisis
013	Suministro de energía

Nota. Especificaciones técnicas son la base para el presupuesto

Capítulo 4

4. Estudio del impacto ambiental

4.1. Descripción del proyecto

En el presente proyecto se llevó a cabo la evaluación de impacto ambiental (EIA) para la implementación de un sistema de ED destinado a la remoción de As en el agua del cantón Santa Rosa. Se identificaron y evaluaron las actividades planificadas en términos de sus posibles impactos ambientales, categorizándolos como positivos o negativos en relación con diversos elementos ambientales susceptibles a alteraciones. Utilizando una lista de control, se aplicó la matriz de Leopold para determinar la magnitud e importancia de estos impactos, donde al final se propusieron medidas de mitigación y prevención para reducir el impacto negativo durante la implementación del proyecto.

El tipo de EIA identificado para el proyecto fue de Análisis de ciclo de vida (ACV) al ser un proyecto de investigación experimental. En esta metodología se consideraron tres etapas de construcción, operación-mantenimiento y cierre del proyecto. Además, se hizo el registro del proyecto en el Sistema Único de información ambiental (SUIA) para determinar el nivel de impacto de tal forma que se asegura que el proyecto cumpla con las normativas y regulaciones ambientales.

Este proyecto está alineado con los ODS 3 (Salud y bienestar), ODS 6 (Agua limpia y saneamiento) y ODS 11 (Ciudades y comunidades sostenibles). La eliminación de As del suministro de agua es esencial para proteger la salud de la población, dado que la exposición a este metaloide puede causar diversos problemas de salud. Además, contribuye a proporcionar un suministro de agua limpio y seguro, en línea con los principios de desarrollo sostenible y la mejora del bienestar comunitario.

4.2. Línea base ambiental

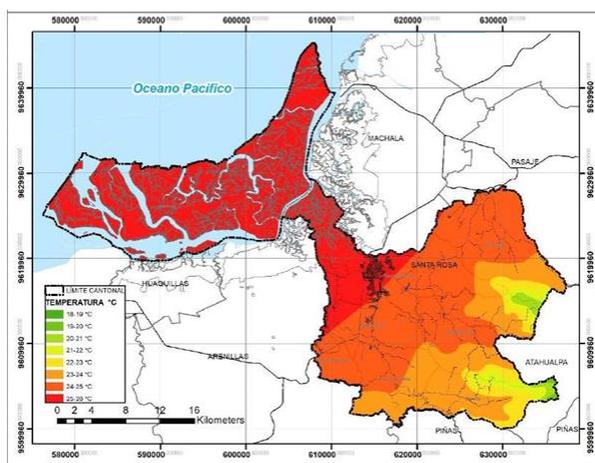
Para determinar la línea base ambiental del medio en su condición actual, se detallaron los elementos y factores del medio. La información es obtenida del Plan de Desarrollo y Ordenamiento del cantón Santa Rosa – El Oro, desarrollado por el Gobierno Autónomo Descentralizado del cantón (Administración 2019-2023).

4.2.1. Clima.

Santa Rosa se caracteriza por tener tres principales tipos de clima en su territorio. En las zonas de la cabecera cantonal, como la Victoria, Bellamaría y otras, prevalece un clima tropical mega térmico seco con precipitaciones que oscilan entre 500 y 1000 mm entre diciembre y mayo. En el noroeste del cantón, específicamente en el Archipiélago, se encuentra un clima tropical mega térmico semiárido con temperaturas promedio anuales de 24 °C y precipitaciones anuales menores a 500 mm durante la época lluviosa de enero a abril. En la figura Figura 4.1 se muestra un mapa con las isotermas del cantón. Finalmente, en las partes altas de La Victoria, Bellamaría y Torata, se experimenta un clima ecuatorial mesotérmico semihúmedo, con temperaturas medias anuales que varían de 12 a 20 °C y precipitaciones medias anuales de 500 a 2000 mm, distribuidas en dos estaciones lluviosas, de febrero a mayo y de octubre a noviembre (GAD Santa Rosa, 2019).

Figura 4.1

Mapa de Isotermas del cantón Santa Rosa



Nota. [GAD Santa Rosa, 2019]

4.2.2. Calidad del agua.

En 2018, el Ministerio del Ambiente (MAE) evaluó la calidad de agua en los ríos de la provincia de El Oro, incluyendo seis puntos en el cantón Santa Rosa. Los ríos analizados que se encuentran ubicados dentro del cantón fueron: río Birón, río Caluguro, río Santa Rosa. Los resultados revelaron altas concentraciones de coliformes totales y fecales en estos ríos, lo que se puede deber a la falta de sistemas adecuados para el tratamiento de aguas residuales e industriales. La industria ganadera es uno de los principales factores en influir en esta problemática debido a la presencia del ganado en zonas de captación de agua en las partes altas de la cuenca. Además, en los resultados se observaron los niveles de plomo, cobre, hierro y cianuro en el agua superan los límites establecidos por las normas ambientales, lo que está vinculado a las actividades mineras en las parroquias de Bellamarí y Torata (GAD Santa Rosa, 2019).

4.2.3. Efectos del cambio climático.

Se ha observado un aumento en la duración de los períodos de sequía en gran parte del territorio, especialmente en la zona oriental, desde el año 2015. Sin embargo, en la zona occidental del cantón, se ha registrado una reducción del número de días secos consecutivos por año. Se proyecta que las sequías más intensas se prolongarán aproximadamente un día y medio adicional hacia el año 2030 y tres días más hacia el 2040 (GAD Santa Rosa, 2019).

Así mismo los días con lluvias extremas aumentaron durante el período de 1981-2015, en la zona oriental del cantón. Esta zona tiene un rango de precipitaciones de 250 a 1250 mm. Se destaca que esta amenaza está relacionada con el riesgo de inundaciones, especialmente en la zona baja del territorio, parte litoral del cantón. Santa Rosa experimenta variaciones significativas de temperaturas. Las temperaturas más altas se registran en la zona noroeste y central del cantón, con un rango de 23 a 26 °C.

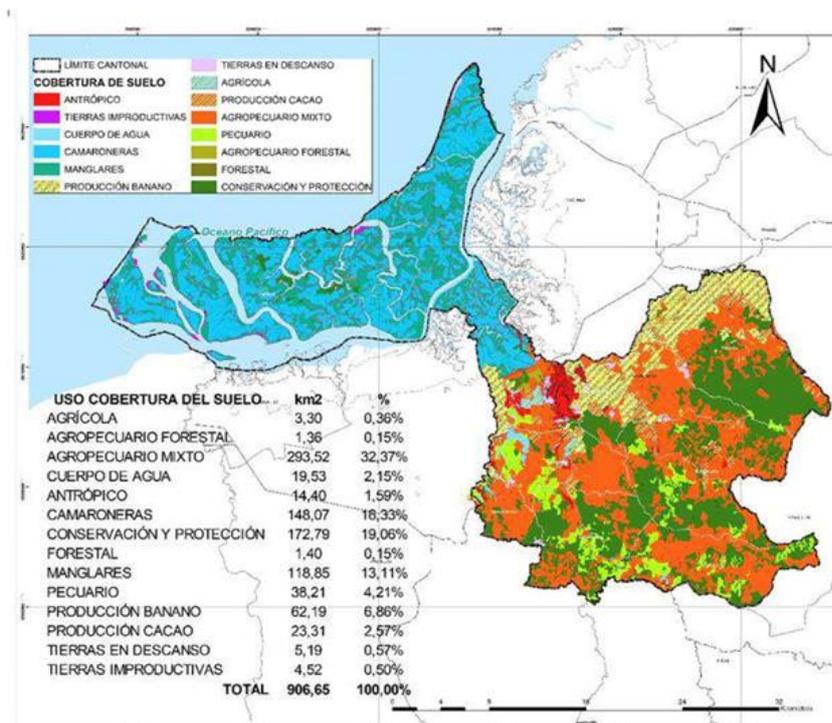
Estas variaciones están influenciadas por los fenómenos climáticos, El Niño, que se asocia con las temperaturas más cálidas, y la corriente fría de Humboldt, que se relaciona con temperaturas más frías (GAD Santa Rosa, 2019).

4.2.4. Uso y cobertura de suelo.

El cantón muestra una intervención humana en su territorio, con alrededor del 63% de su cobertura total destinada a actividades agropecuarias. Esto incluye áreas de agricultura mixta, camaroneras y producción de banano. En contraste, un 32% de su territorio se dedica a la conservación y protección, con bosques de manglar en el Archipiélago. Cuerpos de agua representan el 2% del territorio, y áreas pobladas e infraestructura ocupan un 1.59%. Otras tierras comprenden el 1.07% del área, principalmente en la cabecera cantonal (GAD Santa Rosa, 2019).

Figura 4.2

Mapa de uso y cobertura de suelo del cantón Santa Rosa



Nota. GAD Santa Rosa (2019)

4.2.5. Fauna.

En el año 2019, se llevaron a cabo estudios en la cuenca alta del río Santa Rosa, en las localidades de El Guayabo, Sabayán y Birón Alto. Se identificaron una amplia variedad de especies. Estas áreas son el hogar de especies como el mono aullador, la pava de campo, los tigrillos y los osos hormigueros entre otras. En la zona litoral, en el Archipiélago de Jambelí y la isla Santa Clara, se observa una variedad significativa de aves marinas, como fragatas, piqueros y pelícanos pardos.

Las especies nativas o endémicas del cantón se enfrentan a diversas amenazas, debido a la pérdida significativa de su hábitat, causada por actividades como la explotación maderera, minería y la construcción de carreteras. Además, la conversión de bosques en tierras agrícolas y de pastoreo, así como la caza ilegal y el tráfico de estas especies como mascotas, representan riesgos importantes.

La deforestación que impacta de manera negativa en sus funciones biológicas, movilidad, acceso a alimentos y reproducción, junto con los conflictos con las poblaciones locales que las ven como plagas, también constituyen amenazas. Por último, la contaminación de las fuentes de agua se agrava esta situación (GAD Santa Rosa, 2019).

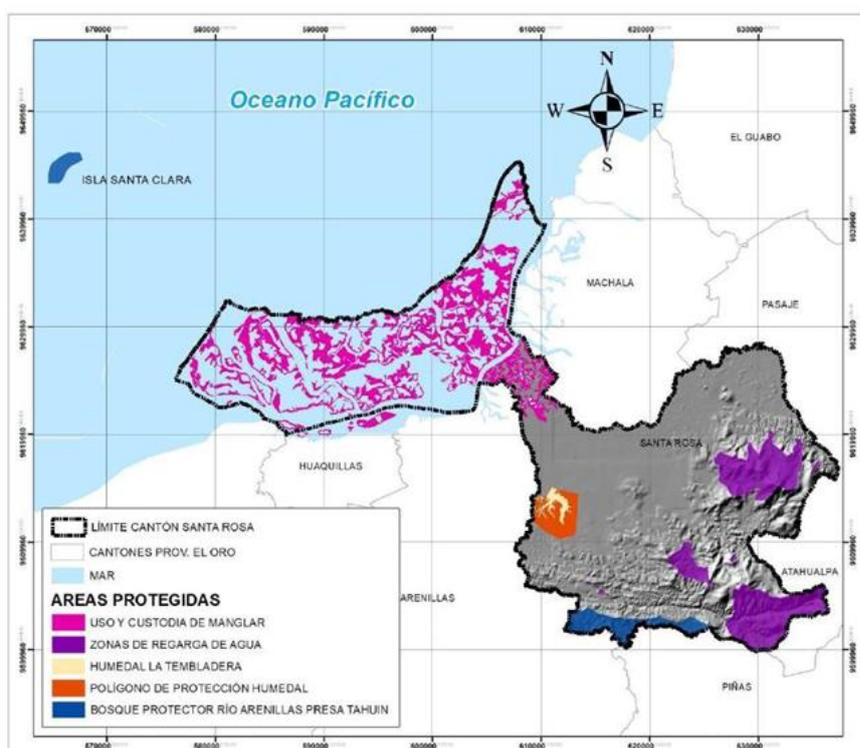
4.2.6. Zonas bajo conservación ambiental.

En el cantón Santa Rosa se identifican cuatro áreas protegidas, abarcando una extensión de 19.560 ha. Estas incluyen: Bosque Protector Río Arenillas Presa Tahuin, manglares, humedal La Tembladera, zonas de recarga de agua e Isla Santa Clara. El Bosque protector se extiende hasta el extremo sur de las parroquias La Avanzada y Torata. Su uso principal abarca actividades como la agricultura, ganadería, servicios agroforestales y conservación de la cobertura vegetal natural. Para la preservación de los manglares el Ministerio del Ambiente estableció 13 acuerdos de Uso y Custodia de Manglar en el cantón, abarcando una extensión de 9.400 ha. Estos acuerdos confieren derechos de uso a organizaciones de cangrejeros, concheros y pescadores. Por otra parte, el concejo municipal de Santa Rosa

declaró 14 Zonas de Recarga de Agua (ZRA) con el propósito de preservar las fuentes de captación de agua. Por último, la Isla Clara es reconocida como sitio RAMSAR, debido a su importancia para la conservación de la biodiversidad y el uso sostenible de los recursos naturales. La isla constituye el principal refugio de aves marinas en la costa continental del país, en virtud de esta importancia, forma parte del Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SNAP) (GAD Santa Rosa, 2019).

Figura 4.3

Mapa de áreas protegidas del cantón Santa Rosa



Nota. GAD Santa Rosa (2019)

4.3. Actividades del proyecto

Para el desarrollo de un sistema avanzado de ED destinado a la remoción de As, en el tratamiento de agua, se llevó a cabo una identificación de las distintas etapas del proyecto, cada una con actividades específicas. No obstante, se debe tomar en cuenta que las acciones asociadas al proyecto tienen impactos ambientales por lo que es necesario

evaluar la magnitud de su influencia en el ecosistema. Las etapas identificadas para la implementación del proyecto abarcan la construcción, operación-mantenimiento y cierre.

4.3.1. Construcción.

Durante la fase de construcción, se ejecutan diversas tareas que incluyen la instalación de infraestructuras hasta el montaje de equipos y sistemas, así como la preparación del sitio. La evaluación ambiental es necesaria en este contexto, con el objetivo de minimizar los potenciales impactos adversos durante esta etapa. La atención se centra en evitar la alteración significativa del suelo y en la gestión eficiente de residuos generados durante el proceso constructivo. Estrategias como la implementación de prácticas constructivas respetuosas con el medio ambiente, se consideran como pilares para garantizar la preservación ambiental a largo plazo.

4.3.2. Operación-Mantenimiento.

Durante esta etapa, es necesario implementar protocolos que optimicen la eficiencia del sistema y reduzca el consumo de recursos, como la energía. Además, se debe realizar un seguimiento sobre el cumplimiento de las regulaciones, tanto en la calidad de agua tratada como la gestión de los residuos generados por el sistema de remoción de As. Las actividades de mantenimiento implican inspecciones regulares, reparación de componentes y gestión adecuada de los subproductos generados. Cabe destacar que, en esta fase, se debe planificar el reemplazo oportuno de las membranas de ED al llegar el final de su ciclo de vida útil. Así mismo, se debe asegurar el suministro constante de energía para mantener la operación interrumpida del sistema. Estas prácticas de mantenimiento no solo buscar preservar la eficiencia del sistema, sino también minimizar cualquier impacto negativo potencial en el entorno.

4.3.3. Cierre.

En la etapa de cierre, se enfoca en llevar a cabo la desactivación del sistema de ED destinado a la eliminación de As. Esta fase implica la ejecución de actividades críticas,

como la adecuada desconexión de los componentes del sistema y la gestión responsable de los residuos generados durante la operación del sistema. Además, se da prioridad a la restauración del área afectada, implementando medidas para minimizar cualquier impacto ambiental residual. En este contexto, se puede llevar a cabo acciones, como la reforestación de áreas despejadas durante la instalación del sistema, recuperación de la alteración del terreno. Este enfoque integral garantiza la seguridad en la desactivación del sistema y regeneración del entorno.

En la Tabla 4.1 se describen las diferentes actividades a desarrollarse en cada etapa del proyecto con la descripción de cada una de ellas.

Tabla 4.1

Descripción de las actividades a desarrollarse en cada etapa del proyecto

Etapa	Actividades	Descripción
Construcción	Preparación del sitio	Limpieza de vegetación Nivelación del terreno Establecimiento de accesos y caminos Geotécnica y estudios de suelos
	Instalación de infraestructuras	Cimentaciones Establecimiento del suministro energético Sistema de captación de agua Creación de áreas de tratamiento
	Montaje de equipos y sistemas	Instalación de celdas de ED, electrodos Montaje de membranas Conexión de electrodos al suministro eléctrico Instalación de tuberías y bombas
Operación- Mantenimiento	Monitoreo	Calidad de agua producida Prevenir obstrucciones o problemas de bombeo Presiones y caudales regulados Evaluar las concentraciones de As
	Inspección y reparación	Evaluación de la integridad de las membranas selectivas

		Limpieza para eliminar incrustaciones o contaminantes en las membranas Identificación de fugas en el sistema
	Gestión de subproductos y residuos	Recuperación y reciclaje de subproductos Clasificar y separar los residuos generados Sistemas de recuperación de agua para reducir el consumo total de agua
Cierre	Desactivación del sistema	Eliminación del suministro eléctrico del sistema Limpieza de membranas y otros componentes Retiro y almacenamiento de equipos
	Eliminación de residuos	Clasificación de los residuos según su composición y peligrosidad Almacenamiento de contaminantes para su posterior almacenamiento
	Restauración del área afectada	Revegetación y restauración de características naturales del terreno Rehabilitación del suelo

Nota. Muestra las etapas para llevar a cabo el desarrollo del proyecto

4.4. Identificación de impactos ambientales

4.4.1. Regularización ambiental nacional.

El Sistema Único de Información Ambiental (SUIA) tiene como principal propósito respaldar la planificación de estrategias ambientales del Ministerio del Ambiente en Ecuador. El registro de un proyecto en el SUIA es importante por el cumplimiento normativo, se destaca como una obligación legal que garantiza que el proyecto esté alineado con las leyes y regulaciones ambientales. Facilita el monitoreo ambiental y seguimiento continuo de los proyectos, permitiendo una evaluación efectiva de su impacto ambiental y la implementación de medidas correctivas.

4.4.2. Categorización Ambiental Nacional.

Dentro del marco regulatorio ambiental el Catálogo de Caracterización Ambiental Nacional (CCAN) se utiliza para estandarizar y facilitar la evaluación del impacto ambiental (EIA) de diversas iniciativas. El CCAN es un listado de diferentes proyectos o actividades categorizados según su impacto y riesgo ambiental que genera al ambiente. En la Tabla 4.2 se presenta las categorías que presenta el CCAN

Tabla 4.2

Nivel de impacto según la categoría presentada por CCAN

Categoría	Nivel de Impacto
I	No significativo
II	Bajo
III	Medio
IV	Alto

Nota. Tomado de CCAN

En el presente proyecto se lleva a cabo el diseño de un sistema de tratamiento de agua, que de acuerdo con la categorización de CCAN pertenece a la categoría III, con un nivel de impacto medio. En la Figura 4.4 se puede observar que la construcción y operación de sistemas para tratamiento de agua de consumo pertenece a la categoría III. Todos los proyectos dentro de esta categoría deben cumplir con la regularización ambiental a través de la obtención de una licencia ambiental. Esta licencia será otorgada por el SUIA.

Figura 4.4

Categorización de las actividades que se llevan a cabo en el presente proyecto según el CCAN.

23.4.2.1.3	Potabilización	
23.4.2.1.3.1	Construcción y/u operación de plantas de potabilización de agua con capacidad mayor a 600 l/s	III

Nota. Capture de imagen tomada de CCAN

4.4.3. Registro de proyecto en SUIA.

Se registró el proyecto en el simulador de proyecto SUIA proporcionado por el Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE). De acuerdo con la información el proyecto tiene un impacto medio, por lo que se requiere de una Licencia Ambiental. Por lo que se debe presentar un informe de evaluación ambiental, consultas previas con las comunidades en caso de que el proyecto afecte áreas pertenecientes a comunidades. Se deberá cumplir con los lineamientos y requisitos establecidos por la autoridad ambiental, además de realizar los pagos de tasas y derechos asociados al trámite de licencia ambiental.

Figura 4.1

Resultados de la regularización ambiental del proyecto en la plataforma de SUIA para determinar el nivel de impacto

Detalles del Proyecto	
Código	generado automaticamente por el sistema
Fecha de registro	fecha de registro del proyecto
Operador	CEDEÑO LAJE JUAN ANDRES
Autoridad Ambiental Competente	GOBIERNO AUTÓNOMO DESCENTRALIZADO PROVINCIAL DE EL ORO
Sector	Otros Sectores
Superficie	0.15000 ha 1500.00000 m2
Actividad	
Su trámite corresponde a un(a)	Licencia Ambiental
El impacto de su actividad	Impacto MEDIO
Actividad principal CIUJ	Actividades de captación de agua de: ríos, lagos, pozos, lluvia etcétera; purificación de agua para su distribución, tratamiento de agua para uso industrial y otros usos; distribución de agua por medio de: tuberías, camiones (tanqueros) u otros medios, a usuarios residenciales, comerciales, industriales y de otro tipo.
¿Su proyecto obra o actividad está financiada por el Banco del Estado?	No
¿Es un proyecto para potabilización de agua?	Si
Opción seleccionada	Proyecto para un caudal mayor a 1100 L/s.
Magnitud de la Actividad	

Nota. Capture de imagen de la evaluación de impacto ambiental en la plataforma de SUIA

4.5. Valoración de impactos ambientales

4.5.1. Lista de control.

Una lista de control es una herramienta estructurada que se utiliza para sistematizar y organizar la evaluación de los posibles impactos ambientales de un proyecto. Permite considerar todos los aspectos ambientales relevantes y que se hayan tomado las medidas

necesarias para mitigar cualquier impacto negativo. Para el proyecto de desarrolló una lista de control que mostrada en la Tabla 4.3

Tabla 4.3

Lista de control para un sistema avanzado de ED para remoción de As

Criterios	Preguntas
Calidad del agua	¿El sistema de ED está diseñado para cumplir con estándares de calidad de agua?
	¿El diseño prioriza el uso eficiente de recursos naturales, como el agua?
	¿Existe un plan de monitoreo continuo para asegurar la calidad del agua después de la implementación del sistema de ED?
Biodiversidad	¿El diseño del sistema minimiza el riesgo de impactos adversos en la fauna acuática o terrestre?
	¿Existen medidas para proteger y preservar áreas de biodiversidad cercana al sitio de implementación?
Uso de Suelo	¿Cómo afectará la implementación del sistema al uso del suelo?
	¿Se ha evaluado la capacidad de recuperación del suelo en caso de derrames o filtraciones?
Residuos	¿Cuál es la cantidad y tipo de residuos generados por el sistema?
	¿El diseño minimiza la generación de residuos o facilita su reciclaje?

	¿El plan de gestión de residuos cumple con las regulaciones locas y nacionales?
	¿Se ha implementado medidas para reducir el consumo de energía?
Energía	¿Incorpora tecnologías de energía renovable?
	¿Existe un plan de monitoreo continuo para evaluar el consumo de energía?
Impacto Social	¿El sistema considera la participación activa de la comunidad en la planificación?
	¿Existen mecanismos de comunicación y divulgación para informar a la comunidad?
Cumplimiento Normativo	¿Existe un plan de monitoreo continuo para garantizar con el cumplimiento de las normativas y regulaciones?
	¿El diseño cumple con las regulaciones ambientales locales y nacionales?

Nota. La tabla es una lista de chequeo para determinar el impacto ambiental de la implementación de un sistema de ED para remover As del agua

4.5.2. Matriz Leopold.

Para evaluar el impacto ambiental del proyecto se utilizó la matriz Leopold. Es una matriz de interacción diseñada para identificar los diversos impactos ambientales potenciales asociados a un proyecto. Esta matriz es bidimensional y se compone de filas y columnas, donde las filas representan los factores ambientales susceptibles a ser afectados, y las columnas representan las acciones planificadas que podrían causar impactos. (Tito, 2020)

Los factores a considerar en el proyecto los cuales fueron divididos en componentes fisicoquímicos, biológico y sociocultural. Por otra parte, las acciones que pueden causar un impacto fueron divididas según las etapas identificadas para la implementación del proyecto

que son, construcción, operación-mantenimiento y cierre. La matriz de Leopold analiza la magnitud e importancia de los impactos identificados. La magnitud indica cuán extenso es el impacto mientras que la importancia refleja la intensidad del impacto. Estos análisis permiten priorizar los impactos según el grado de afectación y ayudan a tomar decisiones informadas para la gestión ambiental del proyecto.

4.5.2.1. Nivel de magnitud de impactos ambientales.

La magnitud de impacto en la matriz de Leopold se refiere a la extensión, duración y reversibilidad del efecto que en una acción planificada puede tener sobre un factor ambiental específico. La extensión describe la amplitud del cambio ambiental. La duración se centra en el período de tiempo durante el cual el impacto persiste. La reversibilidad indica la capacidad de restaurar el entorno a su estado original. Esta evaluación cuantitativa utiliza una escala del 1 al 10, donde 1 representa una alteración mínima y 10 una alteración máxima. La asignación de un valor numérico ayuda a cuantificar la dimensión del impacto, permitiendo una comparación y priorización efectiva entre diferentes acciones y factores ambientales. La presencia del signo “+” o “-” indica si el impacto es considerado positivo o negativo. Para evaluar la magnitud del impacto ambiental, se empleó la Tabla 4.4

Tabla 4.4

Escala de valoración cuantitativa para evaluar la magnitud de los impactos ambientales en una matriz Leopold

Característica	Puntaje				
	1	2.5	5	7.5	10
Extensión	Puntual	Particular	Local	Generalizada	Regional
Duración	Esporádica	Temporal	Periódica	Recurrente	Permanente
Reversibilidad	Completamente reversible	Medianamente reversible	Parcialmente irreversible	Medianamente irreversible	Completamente irreversible

Nota. Tito (2020)

En la Tabla 4.5 se muestran los impactos positivos y negativos identificados debido al desarrollo de un sistema de tratamiento avanzado para eliminar As en Santa Rosa por

medio de la matriz Leopold. Se identificaron un total de 78 impactos de los cuales 40 fueron impactos positivos y 38 impactos negativos.

Durante la fase de construcción, se observó diferentes actividades que ejercen un impacto negativo significativo en el entorno. Entre las actividades se encuentran la preparación del sitio, que incluye la limpieza de vegetación, la nivelación del terreno y la construcción de cimentaciones. Estas acciones han sido identificadas como contribuyentes directos a la erosión del suelo. En la etapa de operación y mantenimiento

En la etapa de operación y mantenimiento, la liberación de efluentes puede resultar perjudicial si no se trata adecuadamente. La liberación no controlada de efluentes no solo puede afectar de manera negativa a la calidad del agua, sino también puede ocasionar efectos perjudiciales para la flora y fauna. La liberación de efluentes en una planta de tratamiento está regulada por normativas para prevenir la contaminación del ecosistema. En este contexto, bajo el criterio de evaluación según la matriz de Leopold, se espera que las repercusiones de esta actividad sean reversibles.

Por último, en la etapa de cierre se identificó que la limpieza de membranas y otros componentes en la desactivación del sistema tiene el mayor impacto sobre la flora y fauna. Durante este proceso, se utilizan productos químicos para la limpieza de membranas, si estos residuos químicos no se gestionan de manera responsable, podrían ser descargados en el medio ambiente acuático, afectando la calidad del agua y representando un riesgo potencial para organismos acuáticos. La liberación de estos residuos podría alterar la composición química del agua, generando cambios perjudiciales para las especies.

No obstante, también se identificaron impactos positivos de la implementación de un sistema de tratamiento avanzado de agua para la eliminación de As. Se evidenció una mejora significativa en la calidad de la vida de la comunidad con la implementación de accesos para la entrega eficiente de materiales esenciales destinados a la construcción del sistema de tratamiento de agua. Estos caminos establecidos se pueden transformar en vías de comunicación esenciales para la población, facilitando la conectividad y mejorando la accesibilidad en la comunidad.

Un sistema de agua proporciona acceso a una fuente de agua confiable y segura de agua potable, reduciendo el riesgo de enfermedades relacionadas con el agua y mejorando la salud general de los residentes. Además, la recuperación y reciclaje de subproductos contribuyen a la sostenibilidad ambiental, minimizando la contaminación y promoviendo prácticas más responsables. Esto tiene un impacto positivo no solo sobre la salud y seguridad de los habitantes, sino que también sobre la preservación de los recursos naturales locales.

La clasificación adecuada de residuos en la comunidad refuerza los aspectos de salud y seguridad. La gestión adecuada de residuos reduce la exposición de productos peligrosos y minimiza la contaminación ambiental. Al separar y gestionar de manera eficiente los desechos, se previenen riesgos para la salud pública, se reduce la propagación de enfermedades y se promueve un entorno más limpio y seguro.

Además, se identificó que la implementación de un sistema avanzada de tratamiento de agua genera impactos positivos en la generación de empleo. En la fase inicial de diseño e instalación hasta la operación continua y el mantenimiento, requiere de la participación de profesionales, de tal manera que se genera empleo y sectores técnicos y de ingeniería. La operación diaria y el monitoreo constante del sistema demandarán de un personal técnico y de mantenimiento, proporcionando oportunidades de empleo local.

Tabla 4.5
Magnitud de impactos ambientales en la matriz de Leopold

ETAPAS			Construcción										Operación y Mantenimiento							Cierre					Impactos positivos (+)	Impactos negativos (-)	Total de impactos						
ACTIVIDADES			Preparación del sitio				Instalación de infraestructuras			Montaje de equipos y sistemas			Monitoreo		Inspección y reparación		Gestión de subproductos y residuos			Desactivación del sistema		Eliminación de residuos		Restauración del área afectada									
Factores			Limpeza de vegetación	Nivelación del terreno	Establecimiento de accesos	Geotécnica y estudios de suelos	Cimentaciones	Establecimiento del suministro energético	Sistema de captación de agua	Creación de áreas de pretratamiento y posttratamiento	Instalación de celdas	Montaje de membranas	Conexión de electrodos al suministro eléctrico	Instalación de tuberías y bombas	Calidad de agua producida	Sistema de bombeo	Sistema de limpieza de membranas	Identificación de fugas en el sistema	Recuperación y reciclaje de subproductos	Clasificación de residuos generados	Liberación de efluentes	Limpeza de membranas y otros componentes	Retiro y almacenamiento de equipos	Clasificación de los residuos según su composición y peligrosidad				Almacenamiento de reactivos	Revegetación y restauración de características naturales del terreno	Rehabilitación del suelo			
Componente físico-químico	Atmósfera	Calidad del aire (Gases, partículas)	-2.5	-2.5		-2.5	-2.5																-1			10	10	2	5	7			
	Agua	Calidad del agua (Superficial, subterránea)						-7.5						-7.5				5		-12										1	3	4	
	Uso de Suelo	Erosión del suelo	-5	-5	-5	-1	-5			-5																	10	10	2	6	8		
		Alteración de superficie y subsuelo	-2.5	-2.5	-5	-1	-5			-5																	10	10	2	6	8		
	Energía	Consumo energético							-5				-7.5		5																1	2	3
Componente biológico	Flora	Alteración de especies terrestres y acuáticas	-2.5	-2.5	-5		-2.5		-5									5	7.5	-7.5	-7.5					10	10	4	7	11			
	Fauna	Calidad de vida silvestre (acuáticas, terrestre)	-2.5	-2.5	-5		-2.5		-7.5	-5									5	7.5	-7.5	-7.5				10	10	4	8	12			
Componente socio-cultural	Socioeconómico	Salud y seguridad							10					10				10	10					10	10					6	0	6	
		Empleo	5	5	5	5	5			5	5	5		5				5						-2.5							10	1	11
		Calidad de vida de la comunidad			7.5			7.5	10					10	10	10		10	10												8	0	8
Total																												40	38	78			
Impactos positivos (+)			1	1	2	1	1	1	2	1	1	1	0	2	2	2	0	2	5	3	0	0	0	0	1	1	5	5					
Impactos negativos (-)			5	5	4	3	5	0	3	4	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	3	2	2	0	0	0	0						
Total de impactos			6	6	6	4	6	1	5	5	1	1	1	2	3	2	0	2	5	3	3	2	2	1	1	5	5						

4.5.2.2. Nivel de importancia de impactos ambientales.

La importancia en la matriz de Leopold se refiere a la intensidad o significancia del impacto identificado. En esta evaluación cualitativa, se asigna un valor numérico del 1 al 10 para representar la importancia subjetiva del impacto en términos de valoración. Para determinar la importancia del impacto ambiental, se utilizó la ecuación 4.1

$$Imp = We * E + Wd * D + Wr * R \quad 4.1$$

Donde, E representa el valor de criterio de extensión, D corresponde al de duración y R al de reversibilidad. Los factores We, Wd y Wr son factores que reciben ponderaciones para la evaluación de la matriz de Leopold. En la Tabla 4.6 se detalla la ponderación de cada factor. Este cálculo de la importancia del impacto proporcionó una medida del nivel de influencia de la acción sobre el entorno.

Tabla 4.6

Ponderaciones para los criterios de evaluación del nivel de importancia según la matriz Leopold.

Duración	Wd=0.40
Extensión	We=0.35
Reversibilidad	Wr=0.25

Nota. Wd + We + Wr = 1.0

En la Tabla 4.7 se muestra el nivel de importancia de cada actividad identificada en el proyecto. Se identificó que el desarrollo de áreas de pretratamiento y postratamiento afectan de manera significativa a la erosión del suelo con un valor de importancia de 7.63. Durante la fase de construcción, las actividades como la excavación y nivelación pueden alterar la cobertura del suelo, aumentando la vulnerabilidad de erosión hídrica y eólica. Adicional se suma, la alteración de los hábitats circundantes, provocando cambios en la distribución y la disponibilidad de recursos para especies terrestres. La vegetación y los hábitats acuáticos pueden sufrir perturbaciones debido a las actividades de construcción. Además, las aguas residuales generadas en el área de pretratamiento pueden transportar sedimentos y contaminantes a cuerpos del agua cercanos, afectando la calidad del hábitat

acuático. Sin embargo, también se destaca con un nivel de importancia de 8.75 la revegetación de características naturales del terreno y la rehabilitación del suelo en la etapa de cierre. Estas prácticas contribuyen a restablecer la cobertura vegetal, promoviendo la biodiversidad y mejorando la calidad del suelo al fomentar la retención de nutrientes y la prevención de la erosión. La reintroducción de vegetación nativa no solo restaura el hábitat para diversas especies, sino que también ayuda a estabilizar el suelo reduciendo el riesgo de deslizamientos y pérdida de suelo.

Tabla 4.7

Magnitud de impactos ambientales en la matriz de Leopold

ETAPAS			Construcción										Operación y Mantenimiento						Cierre				Impactos positivos (+)	Impactos negativos (-)	Total de impactos						
ACTIVIDADES			Preparación del sitio				Instalación de infraestructuras			Montaje de equipos y sistemas			Monitoreo		Inspección y reparación		Gestión de subproductos y residuos		Desactivación del sistema		Eliminación de residuos					Restauración del área afectada					
Factores	Descripción de actividades		Limpeza de vegetación	Nivelación del terreno	Establecimiento de accesos	Geotécnica y estudios de suelos	Cimentaciones	Establecimiento del suministro energético	Sistema de captación de agua	Creación de áreas de pretratamiento y postratamiento	Instalación de celdas	Montaje de membranas	Conexión de electrodos al suministro eléctrico	Instalación de tuberías y bombas	Calidad de agua producida	Sistema de bombeo	Sistema de limpieza de membranas	Identificación de fugas en el sistema	Recuperación y reciclaje de subproductos	Clasificación de residuos generados	Liberación de efluentes	Limpeza de membranas y otros componentes	Retiro y almacenamiento de equipos	Clasificación de los residuos según su composición y peligrosidad	Almacenamiento de reactivos	Revegetación y restauración de características naturales del terreno	Rehabilitación del suelo				
	Componente físico-químico	Atmósfera	Calidad del aire (Gases, partículas)	2.50	3.00		1.60	7.63															1.38			3.65	7.38	2	5	7	
Agua		Calidad del agua (Superficial, subterránea)						2.50						6.13				3.38	2.50												
Uso de Suelo		Erosión del suelo	4.00	4.00	7.63	1.00	4.98			7.63																7.00	7.00	2	6	8	
		Alteración de superficie y subsuelo	1.60	7.00	7.63	1.60	4.00			6.38																7.63	7.63	2	6	8	
Energía		Consumo energético							5.13				6.13			6.13															
Componente biológico	Flora	Alteración de especies terrestres y acuáticas	3.38	2.13	6.23		4.60		7.63									8.75	7.00	5.00	5.00					8.75	8.75	4	6	10	
	Fauna	Calidad de vida silvestre (acuáticas, terrestre)	3.38	7.00	7.63		6.00		5.38	8.25									7.25	6.00	6.63	6.63				6.00	7.00	4	7	11	
Componente socio-cultural	Socioeconómico	Salud y seguridad							8.50						8.50			8.50	8.50					8.50	8.50			6	0	6	
		Empleo	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50			6.50	6.50	6.50		6.50				6.50					7.00								
		Calidad de vida de la comunidad			9.13			9.13	9.13					9.13	9.13	9.13			9.13	9.13											
Total			6	6	6	4	6	1	5	5	1	1	1	2	3	2	0	2	5	3	3	2	2	1	1	5	5	40	49	89	

4.6. Valor de índice de impacto ambiental

El valor de índice de impacto ambiental es la media geométrica de importancia y magnitud. Es determinado por la ecuación (4.2)

$$|IA| = \sqrt{Importancia \times |Magnitud|} \quad (4.2)$$

El índice de impacto ambiental se evalúa mediante una escala cualitativa, donde los impactos con un valor superior a 6.5 se consideran altamente significativos, aquellos que se encuentra entre un rango de 6.5 y 4.5 se clasifican como significativos. Los impactos ambientales con un valor inferior a 4.5 se categorizan como despreciables, mientras que aquellos con un valor superior a 0 se consideran benéficos. En la Tabla 4.8 se muestra la tabla de valoración

Tabla 4.8

Escala de valoración cualitativa para la matriz de Leopold

Calificación del Impacto Ambiental	Valor del índice de impacto ambiental (IA)
Altamente significativo	$ IA \geq 6.5$
Significativo	$6.5 > IA \geq 4.5$
Despreciable	$ IA < 4.5$
Benéfico	$IA > 0$

Nota. Ponderación para la matriz cualitativa de Leopold

En la Tabla 4.9 se muestran los resultados de la valoración cualitativa para la matriz de Leopold. La etapa de construcción es donde se presentaron la mayor cantidad de actividades clasificadas con un impacto ambiental significativo. Estas actividades fueron el establecimiento de accesos, construcción de cimentaciones, áreas de pretratamiento, postratamiento. Las actividades con un índice de impacto altamente significativo fueron la implementación de un sistema de captación, liberación de efluentes del sistema y limpieza de membranas y otros componentes.

La implementación del sistema de captación implica la modificación del entorno natural para instalar infraestructuras, lo que puede resultar en cambios en la topografía y en

la pérdida de hábitats naturales. Esta alteración afecta principalmente a la fauna y flora, desencadenando en un impacto significativo en la biodiversidad y la estructura del ecosistema. La liberación de efluentes del sistema puede introducir contaminantes a los recursos hídricos. Estos contaminantes afectan negativamente a la calidad del agua y provocan consecuencias perjudiciales para la salud de organismos acuáticos, así para aquellos que dependen de estos recursos. La limpieza de membranas, aunque es esencial para mantener la eficiencia del sistema, puede generar residuos o materiales que, si no se gestionan de manera adecuada, podrían contribuir a la contaminación ambiental y a la degradación del suelo.

Por otra parte, en las tres etapas identificadas en el proyecto tanto, construcción, operación-mantenimiento y cierre tiene un nivel de impacto significativo en la generación de empleo. Además, se distinguieron que las actividades sobre la gestión de subproductos y residuos tiene un impacto altamente significativo durante el proceso de tratamiento, se generan subproductos y soluciones concentradas que requieren una gestión cuidadosa para evitar posibles impactos ambientales. La disposición inadecuada de estos subproductos puede resultar en la contaminación del suelo y del agua. La presencia de As residual resalta la necesidad de un manejo seguro. La implementación de estrategias de gestión de residuos, como el reciclaje y la disposición adecuada en instalaciones designadas, es esencial para minimizar los impactos negativos y cumplir con las normativas ambientales. La participación comunitaria en la sensibilización sobre la importancia de una gestión adecuada puede fomentar prácticas sostenibles y reducir la generación de residuos, contribuyendo así a una gestión responsable y consciente de los subproductos generados en el proceso de tratamiento avanzado de agua para la eliminación del As.

Tabla 4.9

Valoración cualitativa del impacto ambiental en matriz de Leopold

ETAPAS			Construcción											Operación y Mantenimiento						Cierre				Impactos positivos (+)	Impactos negativos (-)	Total de impactos				
ACTIVIDADES			Preparación del sitio				Instalación de infraestructuras				Montaje de equipos y sistemas			Monitoreo		Gestión de subproductos y residuos		Desactivación del sistema		Eliminación de residuos		Restauración del área afectada								
Factores	Descripción de actividades		Limpeza de vegetación	Nivelación del terreno	Establecimiento de accesos	Geotécnica y estudios de suelos	Cimentaciones	Establecimiento del suministro energético	Sistema de captación de agua	Creación de áreas de pretratamiento y posttratamiento	Instalación de celdas	Montaje de membranas	Conexión de electrodos al suministro eléctrico	Instalación de tuberías y bombas	Calidad de agua producida	Sistema de bombeo	Identificación de fugas en el sistema	Recuperación y reciclaje de subproductos	Clasificación de residuos generados	Libерación de efluentes	Limpeza de membranas y otros componentes	Retiro y almacenamiento de equipos	Clasificación de los residuos según su composición y peligrosidad	Almacenamiento de reactivos	Revegetación y restauración de características naturales del terreno	Rehabilitación del suelo				
	Componente físico-químico	Atmósfera	Calidad del aire (Gases, partículas)	-2.50	-2.74	0.00	-2.00	-4.37	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-1.17	0.00	0.00	6.04	8.59	14.63	-12.78	1.85
Agua		Calidad del agua (Superficial, subterránea)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-4.33	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	6.78	0.00	0.00	4.11	0.00	-5.48	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.11	-9.81	-5.70	
Uso de Suelo		Erosión del suelo	-4.47	-4.47	-6.17	-1.00	-4.99	0.00	0.00	-6.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	8.37	8.37	16.73	-27.28	-10.55
		Alteración de superficie y subsuelo	-2.00	-4.18	-6.17	-1.26	-4.47	0.00	0.00	-5.65	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	8.73	8.73	17.46	-23.74	-6.28
Energía		Consumo energético	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-5.06	0.00	0.00	0.00	-6.78	0.00	0.00	-5.53	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-17.37	-17.37
Componente biológico	Flora	Alteración de especies terrestres y acuáticas	-2.90	-2.30	-5.58	0.00	-3.39	0.00	0.00	-6.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	6.61	7.25	-6.12	-6.12	0.00	0.00	0.00	0.00	9.35	9.35	32.57	-26.48	6.09	
	Fauna	Calidad de vida silvestre (acuáticas, terrestre)	-2.90	-4.18	-6.17	0.00	-3.87	0.00	-6.35	-6.42	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	6.02	6.71	-7.05	-7.05	0.00	0.00	0.00	0.00	7.75	8.37	28.84	-36.96	-8.11	
Componente socio-cultural	Socioeconómico	Salud y seguridad	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	9.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	9.22	0.00	0.00	9.22	9.22	0.00	0.00	0.00	9.22	9.22	0.00	0.00	55.32	0.00	55.32	
		Empleo	5.70	5.70	5.70	5.70	5.70	0.00	0.00	5.70	5.70	5.70	0.00	5.70	0.00	0.00	5.70	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-4.18	0.00	0.00	0.00	0.00	57.01	-4.18	52.83
		Calidad de vida de la comunidad	0.00	0.00	8.27	0.00	0.00	8.27	9.55	0.00	0.00	0.00	0.00	9.55	9.55	9.55	9.55	9.55	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	73.86	0.00	73.86
Total			9.08	12.18	10.13	1.44	15.39	8.27	3.03	18.72	5.70	5.70	-6.78	15.25	25.55	4.02	15.25	35.52	23.17	18.65	-13.17	-5.36	9.22	9.22	40.24	43.41	300.53	158.60	141.9	

4.7. Medidas de prevención/mitigación

La implementación de medidas de mitigación en un sistema de tratamiento avanzado para la eliminación de As del agua es fundamental para mantener la interacción entre el proceso de tratamiento y el entorno, asegurando la integridad del ecosistema local. A medida que se adoptan tecnologías avanzadas para abordar la presencia de As, es esencial anticipar y gestionar los posibles impactos ambientales y comunitarios. En la Tabla 4.10 se presentaron las medidas de prevención y mitigación para las actividades que generaron un impacto negativo en su implantación

Uno de los impactos identificados es la liberación de efluentes del sistema que puede ocasionar alteraciones en la calidad del agua afectando al mismo tiempo a las especies acuáticas. Para este mitigar este impacto se propone las inyecciones geológicas como una opción viable. La inyección geológica implica la inyección controlada de efluentes concentrados con arsénico en formaciones geológicas profundas, como capas de roca permeable ubicadas a considerable profundidad en la tierra. Este proceso confina los efluentes contaminados, evitando la liberación directa en cuerpos de agua superficiales. Las formaciones geológicas receptoras deben ser capaces de retener y contener los efluentes sin riesgo de migración hacia capas acuíferas potables (Bundschih et al., 2015)

El presente diseño de ED para remoción de As ha evidenciado un consumo de energía bajo, por lo que se consideró como respuesta favorable la implementación de paneles solares para reducir el impacto del consumo energético en la red pública de la comunidad. La energía solar es una fuente de energía renovable que puede proporcionar energía eléctrica de manera confiable y sostenible. Los paneles solares pueden ser instalados en la comunidad para generar energía eléctrica a partir de la luz solar, lo que puede ser utilizado para alimentar el sistema de ED y otros equipos eléctricos necesarios. Además, la energía solar es una fuente de energía limpia y renovable que no produce emisiones de gases de efecto invernadero ni otros contaminantes atmosféricos, lo que puede contribuir a la reducción de la huella de carbono de la comunidad.

Tabla 4.10

Estrategias de mitigación adoptadas para prevenir impactos ambientales negativos

Impacto ambiental negativo	Actividad	Medida de prevención/mitigación
Erosión del suelo	Establecimiento de accesos	Implementar prácticas de revegetación en áreas de acceso para reducir la exposición del suelo
	Construcción de cimentaciones	Emplear barreras de contención y sistemas de drenaje para canalizar y controlar el flujo de agua durante la construcción
	Desarrollo de áreas de tratamiento y postratamiento	Aplicar coberturas temporales sobre áreas de suelo expuesto para evitar la erosión
Alteración de flora	Desarrollo de áreas de tratamiento y postratamiento	Establecer zonas de amortiguamiento con vegetación para prevenir la escorrentía y reducir la erosión
	Establecimiento de accesos	Limitar la extensión de áreas de acceso para minimizar la interferencia con la flora circundante Emplear rutas preexistentes y caminos designados para reducir la perturbación de la flora
	Desarrollo de áreas de tratamiento y postratamiento	Seleccionar ubicaciones que minimicen el impacto sobre la flora existente
	Liberación de efluentes	Realizar un tratamiento adicional de efluentes para reducir la presencia de sustancias que puedan afectar la flora
	Limpieza de membranas y otros componentes	Utilizar métodos de limpieza no químicos siempre que sea posible para reducir la exposición de agentes potencialmente dañinos Implementar programas de mantenimiento preventivo para reducir la frecuencia y la intensidad de las operaciones de limpieza

Alteración de fauna	Establecimiento de accesos	Limitar el tráfico vehicular en áreas sensibles para minimizar disturbios a la fauna Establecer corredores de paso seguros para la fauna durante la construcción de accesos
	Desarrollo de áreas de tratamiento y postratamiento	Incorporar zonas de refugios naturales para la fauna durante el desarrollo de áreas de tratamiento
	Liberación de efluentes	Implementar procesos de tratamiento avanzados para reducir la presencia de sustancias perjudiciales en los efluentes Establecer sistemas de liberación gradual para evitar cambios bruscos en la calidad de agua circundante
	Limpieza de membranas y otros componentes	Implementar barreras físicas o protocolos de desalojo temporal para proteger a la fauna durante las actividades de limpieza
Consumo energético	Conexión de electrodos al suministro eléctrico	Implementar sistemas de fuentes de energía renovable como paneles solares
	sistema de bombeo	Utilizar bombas de alta eficiencia energética para reducir el consumo Implementar sistemas de control automático para ajustar la velocidad de las bombas según la demanda
Calidad del agua	Liberación de efluentes	Implementar procesos de tratamiento adicionales para reducir la concentración de compuestos antes de la liberación Monitorear continuamente la calidad del agua liberada y ajustar los procesos según sea necesario Inyección geológica como método de disposición de efluentes concentrados con As

Limpieza de membranas y otros componentes	Utilizar métodos de limpieza que minimicen la introducción de productos químicos en el agua Recoger y tratar adecuadamente los efluentes generados durante la limpieza para evitar la contaminación del agua circundante
---	--

Nota. La tabla muestra las medidas de mitigación adoptadas para cada etapa de proyecto y contrarrestar el impacto ambiental.

Capítulo 5

5. Presupuesto

5.1. Estructura Desglosada de Trabajo

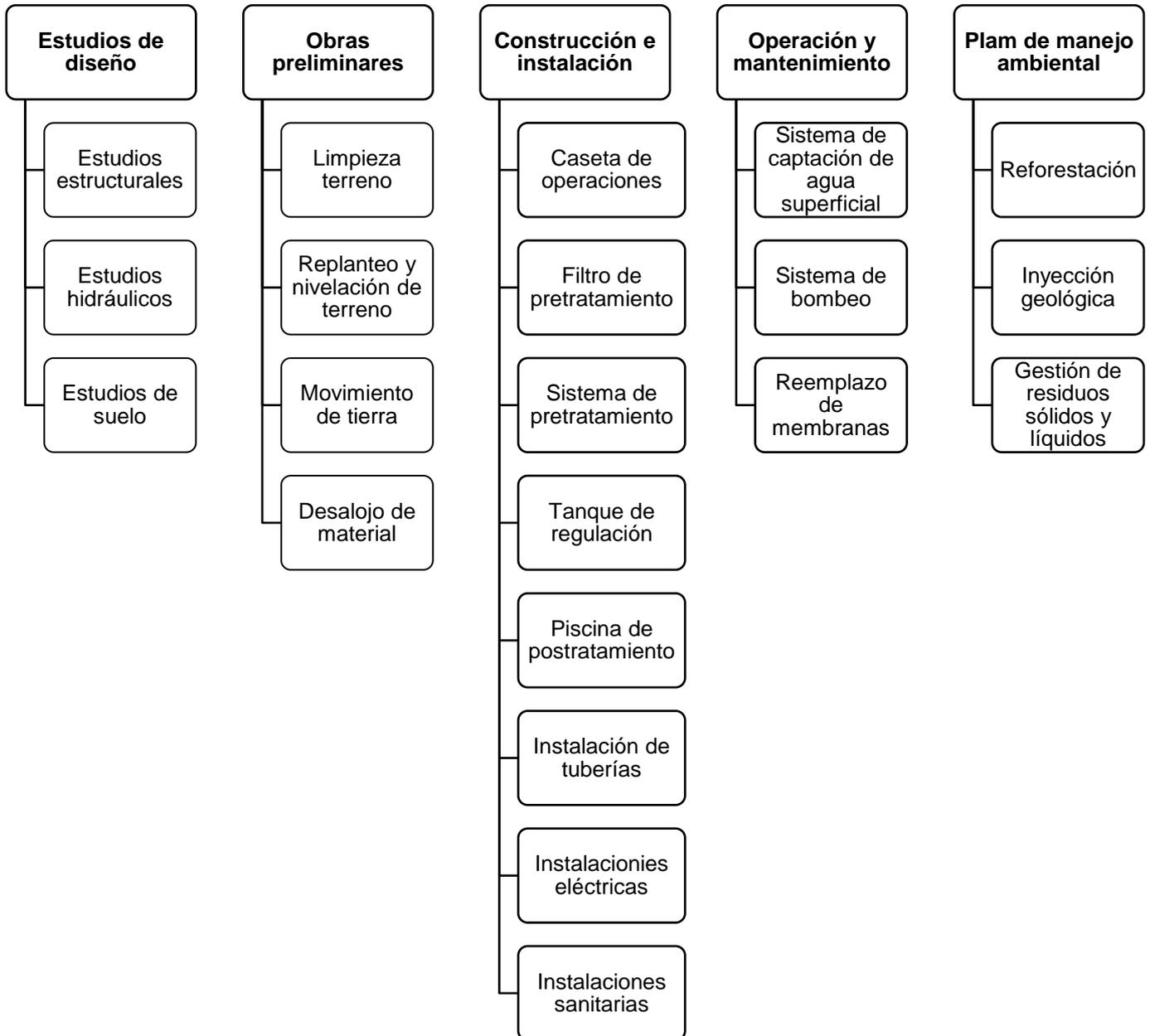
En la Tabla 5.1 se detalla la estructura desglosada del trabajo esencial para llevar a cabo el desarrollo del sistema de ED destinado a la eliminación de As en el suministro de agua del cantón Santa Rosa. Las etapas definidas, abarcan desde los estudios iniciales y el diseño detallado hasta la implementación, operación y mantenimiento del sistema.

En la fase inicial del proyecto, se llevó a cabo estudios de diseños, que abarcan evaluaciones estructurales, hidráulicas y de suelo, con el objetivo de analizar la viabilidad técnica y económica del sistema. Los estudios estructurales se enfocan en evaluar la resistencia y estabilidad de las diversas estructuras del proyecto. Por otro lado, las obras preliminares comprenden la preparación del terreno donde se instalará el sistema, desde la limpieza y nivelación hasta la excavación del terreno donde se instalará el sistema, desde la limpieza y nivelación hasta la excavación necesaria para las estructuras principales. La fase de construcción e instalación se dedica a materializar el diseño elaborado, involucrando la instalación física de las unidades de ED, la disposición de membranas y electrodos, y la implementación de infraestructuras como tuberías y bombas.

Una vez que el sistema que esté en funcionamiento, la etapa de operación incluye el arranque del sistema, el monitoreo constante de su rendimiento y la ejecución de programas de mantenimiento preventivo y correctivo. La etapa final, el plan de manejo ambiental, establece un sistema de monitoreo ambiental destinado a evaluar el impacto del proyecto en el entorno, asegurando la preservación de aspectos ambientales clave a lo largo de todas las fases del proyecto.

Figura 5.1

Estructura desglosada de trabajo para el diseño del sistema de ED para la remoción de As presente en el agua



Nota. Principales actividades que fueron consideradas en las diferentes etapas del proyecto

5.2. Rubros y análisis de precios unitarios

En la etapa de diseño, se llevan a cabo tres tipos de estudios esenciales para la planificación del sistema: estudios estructurales, hidráulicos y de suelos. Estos análisis son necesarios para garantizar que el diseño de las estructuras y sistemas cumplan con las demandas de la comunidad, y aseguren la viabilidad del proyecto.

En la segunda etapa de obras preliminares, se destacan las actividades como limpieza de terreno que tiene como finalidad la eliminación de cualquier obstrucción o vegetación no deseada, proporcionando un predio limpio para la construcción. El replanteo y nivelación aseguran que el terreno esté uniforme y alineado de acuerdo con los planos. El movimiento de tierra es necesario para adaptar la topografía a las necesidades del proyecto. Por último, el desalojo de material gestiona la eliminación de tierra y otros materiales excavados contribuyendo a la eficiencia del proceso constructivo.

La etapa siguiente se centra en la construcción e instalación, abarcando diversos componentes esenciales del proyecto. Esto incluye la implementación del filtro lento de arena, que sirve como sistema de pretratamiento, así como la construcción del sistema de ED, que comprende el desarrollo a escala industrial con electros y membranas. Además, contempla la construcción de un tanque de regulación destinado al almacenamiento del agua tratada, la cual será posteriormente distribuida a la red pública de la comunidad. Así mismo, se incorpora la construcción de una piscina de postratamiento diseñada para almacenar temporalmente el agua concentrada con As, sujeta de tratamiento antes de ser liberada al entorno.

La etapa de operación y mantenimiento involucra las actividades de operación de un sistema de bombeo con la capacidad de extraer agua de superficie de 2250 m³ de agua diarios. También involucra el mantenimiento de membranas que se debe realizar de manera anual, en donde se reemplaza las membranas desgastadas por unas nuevas. Y el monitoreo de calidad de agua en el que se gestiona los residuos líquidos y sólidos del tratamiento.

En la etapa final del plan de manejo ambiental, se incorporaron actividades cruciales para mitigar el impacto ambiental del proyecto. Se incluye un programa integral de reforestación, con el propósito de restaurar las áreas circundantes del proyecto que fueron intervenidas para facilitar los accesos y preparar el terreno para las construcciones. Asimismo, se contempla la técnica de inyección geológica, la cual implica el almacenamiento controlado de agua concentrada con As en capas geológicas adecuadas, garantizando un gestión segura y sostenible de este subproducto del tratamiento.

En la Tabla 5.1 se especifican los diferentes rubros que componente el proyecto, junto con sus respectivos precios unitarios, de acuerdo con las condiciones del mercado ecuatoriano.

Tabla 5.1

Análisis de precios unitarios - Sistema avanzado de electrodiálisis para remoción de As en el agua

CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	PRECIO UNITARIO
1.0	ESTUDIOS DE DISEÑO		
1.1	Estudios estructurales	global	\$2,320.07
2.0	Estudios hidráulicos	global	\$103.97
3.0	Estudios de suelos	global	\$878.84
2.0	OBRAS PRELIMINARES		
2.1	Limpieza de terreno	m ²	\$16.16
2.2	Replanteo y nivelación	m ²	\$3.02
2.3	Movimiento de tierra	m ³	\$17.77
2.4	Desalojo de material	m ³	\$2.71
3.0	CONSTRUCCIÓN E INSTALACIONES		
3.1	Caseta de operaciones	u	\$70.72
3.2	Hormigón simple replantillo $f_c=140$ kg/cm ²	m ³	\$149.88
3.3	Encofrado y desencofrado con madera	m ²	\$17.98
3.4	Acero de refuerzo $f_y=4200$ kg/cm ²	kg	\$1.62
3.5	Malla electrosoldada 6-10	m ²	\$8.00
3.6	Hormigón simple $f_c= 210$ kg/cm ²	m ³	\$172.08

3.7	Tubería HD desagüe d=400 mm	m	\$129.35
3.8	Filtro lento de arena de flujo descendente	u	\$3,753.77
3.9	Sistema de electrodiálisis	u	\$17,514.00
3.10	Instalaciones eléctricas	global	\$14,387.46
3.11	Tanque de regulación	u	\$17,880.12
3.12	Piscina de postratamiento	u	\$3,451.68
4.0	OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO		
4.1	Sistema de bombeo	u	\$11,939.51
4.2	Mantenimiento de membranas (anual)	global	\$110.95
4.3	Monitoreo de calidad de agua	global	\$1,696.25
5.0	PLAN DE MANEJO AMBIENTAL		
5.1	Inyección geológica	m ³	\$3.90
5.2	Reforestación	m ²	\$14.10

Nota. Rubros - Sistema de ED para remoción de As

5.3. Descripción de cantidades de obra

En la sección “Anexo B: Análisis de precios unitarios” se proporciona el detalle de cada uno de los rubros necesarios para el desarrollo del proyecto. Se realizaron estimaciones para la cuantificación de los diferentes rubros, dado que el alcance del proyecto no incluye diseños estructurales ni instalaciones detalladas. Cada rubro contiene una descripción detallada de los materiales a utilizar, la mano de obra especializada o no especializada, así como el equipo, maquinaria y herramientas necesarios.

5.4. Valoración integral del costo del proyecto

La fase de diseño estima un costo aproximado de \$ 3,302.99, mientras que las obras preliminares ascienden a \$ 21, 495.60. La construcción e instalación, siendo la etapa más costosa, representa el 80% del presupuesto total referencial, con un monto de \$ 198,223.25. La fase de operación y mantenimiento se estima en \$ 13,746.71, y el plan de manejo ambiental tiene un costo de \$7,985.70.

El presupuesto total referencial para la implementación de un sistema avanzado de ED destinado a la eliminación de As en el agua para una comunidad de 5000 habitantes en el cantón Santa Rosa asciende a \$ 244,754.14. Eso se traduce a un costo unitario por unidad de construcción de \$ 306/m². Es importante tener en cuenta que este presupuesto es referencia y podría variar durante la ejecución del proyecto, dependiendo de las necesidades y condiciones específicas.

Tabla 5.2

Presupuesto referencial de la implementación del sistema avanzado de ED para remoción de As del agua

CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL
1	ESTUDIOS DE DISEÑO				\$ 3,302.88
1.1	Estudios estructurales	global	1.00	\$2,320.07	\$ 2,320.07
2.0	Estudios hidráulicos	global	1.00	\$103.97	\$ 103.97
3.0	Estudios de suelos	global	1.00	\$878.84	\$ 878.84
2.0	OBRAS PRELIMINARES				\$ 21,495.60
2.1	Limpieza de terreno	m ²	800.00	\$16.16	\$ 12,931.20
2.2	Replanteo y nivelación	m ²	800.00	\$3.02	\$ 2,419.20
2.3	Movimiento de tierra	m ³	300.00	\$17.77	\$ 5,331.60
2.4	Desalojo de material	m ³	300.00	\$2.71	\$ 813.60
3.0	CONSTRUCCIÓN E INSTALACIONES				\$ 198,223.25
3.1	Caseta de operaciones	unidad	1	\$70.72	\$ 70.72
3.2	Hormigón simple replantillo fc=140 kg/cm ²	m ³	250	\$149.88	\$ 37,470.00
3.3	Encofrado y desencofrado con madera	m ³	430	\$17.98	\$ 7,729.68
3.4	Acero de refuerzo fy=4200 kg/cm ²	kg	519.77	\$1.62	\$ 842.03
3.5	Malla electrosoldada 6-10	m ²	539	\$8.00	\$ 4,314.16
3.6	Hormigón simple fc= 210 kg/cm ²	m ³	430	\$172.08	\$ 73,994.40
3.7	Tubería HD desagüe d=400 mm	m	130	\$129.35	\$ 16,815.24
3.8	Filtro lento de arena de flujo descendente	unidad	1	\$3,753.77	\$ 3,753.77
3.9	Sistema de electrodiálisis	unidad	1	\$17,514.00	\$ 17,514.00
3.10	Instalaciones eléctricas	global	1	\$14,387.46	\$ 14,387.46
3.11	Tanque de regulación	unidad	1	\$17,880.12	\$ 17,880.12
3.12	Piscina de postratamiento	unidad	1	\$3,451.68	\$ 3,451.68
4.0	OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO				\$ 13,746.71
4.1	Sistema de bombeo	unidad	1	\$11,939.51	\$ 11,939.51

4.2	Mantenimiento de membranas (anual)	global	1	\$110.95	\$	110.95
4.3	Monitoreo de calidad de agua	global	1	\$1,696.25	\$	1,696.25
5.0	PLAN DE MANEJO AMBIENTAL				\$	7,985.70
5.1	Inyección biológica	m ³	963	\$3.90	\$	3,755.70
5.2	Reforestación	m ²	300	\$14.10	\$	4,230.00
TOTAL					\$	244,754.14

Nota. Muestra el total del presupuesto referencial - sistema de ED para remoción de arsénico

5.5. Cronograma de obra

La duración estimada del proyecto de implementación de un sistema de ED para una comunidad de 5000 habitantes en el cantón Santa Rosa fue de 8 meses y 19 días. Durante este período, se estipularon diferentes actividades, entre las que se incluyen estudios de diseño, obras preliminares, construcción e instalaciones, operación y mantenimiento, así como la elaboración del plan de manejo ambiental.

Figura 5.2

Cronograma de obra - Página 1

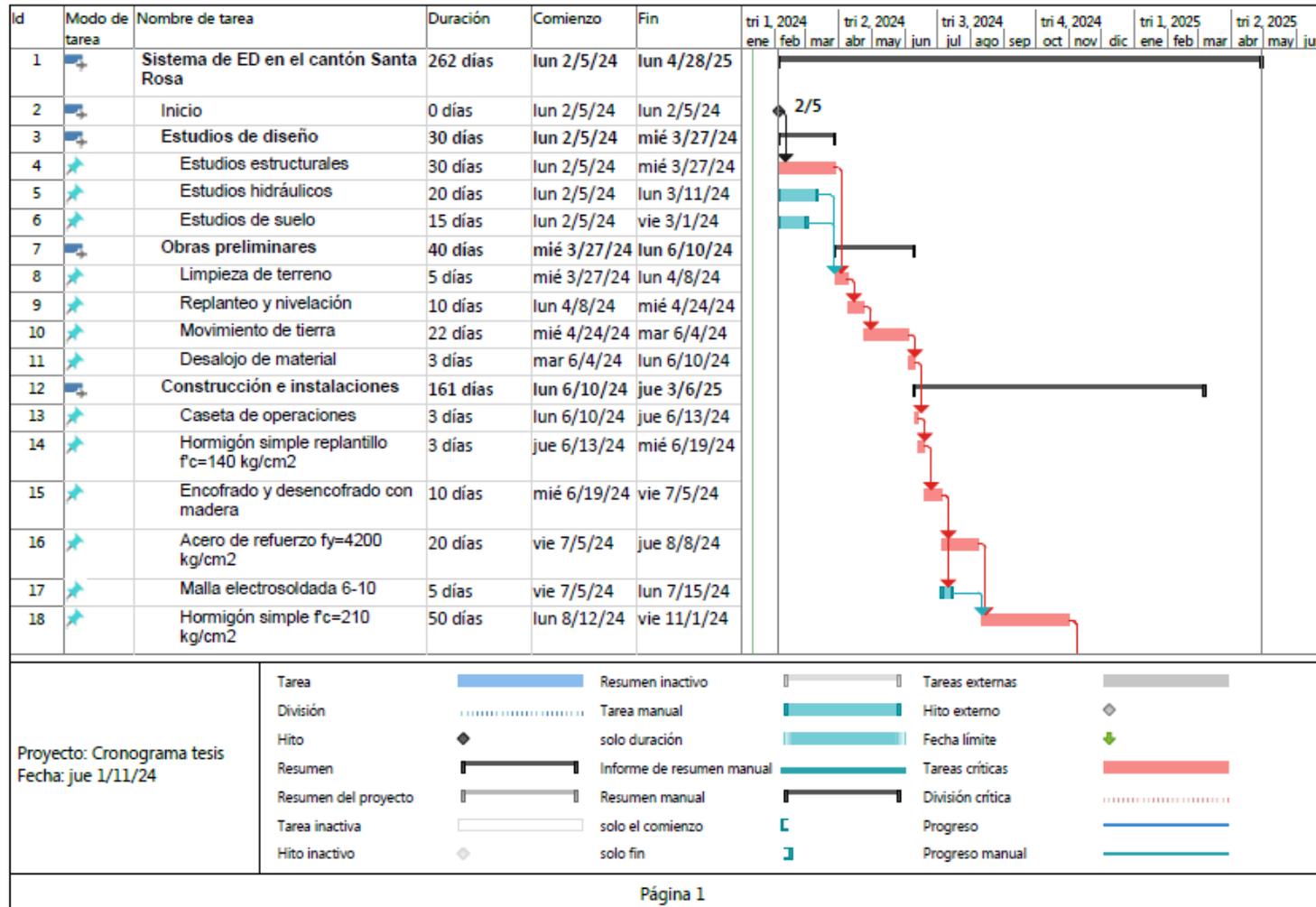
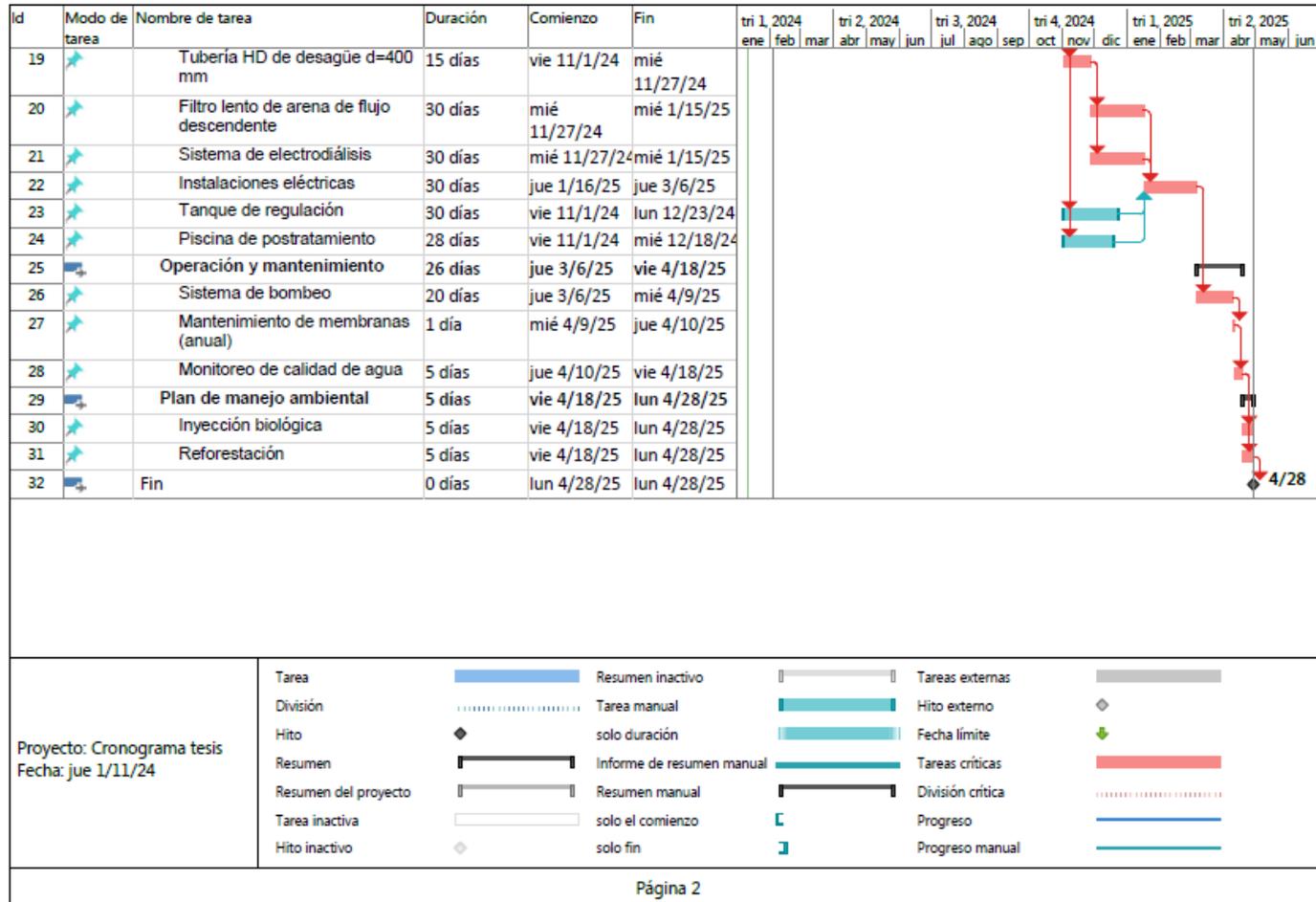


Figura 5.3

Cronograma de obra - Página 2



Capítulo 6

6. Conclusiones y recomendaciones

6.1. Conclusiones

Este proyecto propone el diseño de un sistema de tratamiento avanzado para la remoción de As en el agua de captación de la planta de tratamiento "Los Jardines" en la ciudad de Santa Rosa, El Oro, Ecuador, debido a que la concentración de As en agua de consumo supera los límites recomendados por la normativa ecuatoriana.

Como resultado de la caracterización hidroquímica se identificó que el agua de captación, muestreada en la quebrada El Panteón, es de tipo sulfatada cálcica-sódica con concentraciones de 115.0 mg/L, 38.4 mg/L y 11.2 mg/L para SO_4^{2-} , Ca^{2+} y Na^+ , respectivamente, los cuales se encuentran por debajo del LMP para aguas superficiales. Con respecto a la determinación del contenido de As, se reportó una concentración inicial de 0.019 mg/L que supera el LMP de 0.010 mg/L establecido para agua de consumo.

Se evaluaron tres alternativas para la remoción de As abarcando metodologías convencionales como la prueba de jarras, hasta tecnologías de tratamiento avanzado como la ósmosis inversa (OI) y la electrodiálisis (ED). La prueba de jarras reveló una eficiencia de remoción de As del 40.38%, junto con una generación de residuos elevada y una limitada capacidad de escalabilidad y adaptabilidad. A pesar de estas limitaciones, cabe destacar su baja energía específica a escala de laboratorio, registrando 0.04 kWh/m³. En contraste, tanto la OI como la ED destacaron por sus elevados porcentajes de remoción, alcanzando valores del 95%, y una generación de residuos media. Sin embargo, se observó una diferencia significativa en el consumo energético: la OI requiere un suministro constante de 220 V, mientras que la ED presenta un bajo consumo energético de 0.36 kWh/m³, siendo adaptable para comunidades rurales mediante la implementación de paneles solares.

Se evaluaron los parámetros de diseño, incluyendo volumen, voltaje y porcentaje de recuperación, para la configuración del sistema de ED. Los resultados resaltan la influencia directa del caudal en el consumo de energía específica; al trabajar con un volumen constante de 1000 mL y caudales de 100, 200, 400, 500 y 600 mL/min, se registraron

energías específicas de 0.23, 0.26, 0.32, 0.36 y 0.43 kWh/m³, respectivamente. Así mismo, al variar los voltajes a 4, 6 y 8 V, se obtuvieron porcentajes de remoción de 53.00, 68.42 y 70.82%, respectivamente, lo cual indica que el aumento del voltaje se traduce en una mejora significativa en la eficiencia del sistema. En todas las configuraciones, la remoción de As se mantuvo por debajo de LMP de 0.010 mg/L. Con base en estos resultados, se determinó que la configuración óptima del sistema sería un caudal de 500 mL/min y un voltaje de 6V.

Para evaluar la escalabilidad del sistema, se aumentó el volumen de 1000 a 2000, 4000 y finalmente 5000 mL. Los resultados revelaron que, con el incremento del volumen, las concentraciones de As fueron de 0.0061, 0.0064, 0.0060 y 0.0052 mg/L, respectivamente. Esto sugiere que, al trabajar con un volumen de 5000 mL, la eficiencia de remoción experimenta un aumento del 14% en comparación con el volumen de 1000 mL. En conclusión, el diseño de un sistema de ED para la remoción de As reveló resultados significativos bajo condiciones óptimas, tales como un voltaje de 6V, un porcentaje de recuperación teórico del 80%, un caudal de 500 mL/min y un volumen de tratamiento de 5000 mL. Estos parámetros condujeron a una eficiencia de remoción del 73.12%, una baja energía específica de 0.059 kWh/m³, y un costo energético de \$ 0.006 por m³ de agua tratada.

En este proyecto también se evaluó la presencia de otros elementos potencialmente tóxicos (EPT) como Fe, Cu, Pb, Ni, y Mn. Las concentraciones de Mn superaron el LMP establecidos por la normativa (0.050 mg/L), mientras que los niveles del resto de EPT se mantuvieron dentro de los límites permitidos. En cuanto al Mn, cuya concentración inicial fue de 0.070 mg/L, las condiciones óptimas de diseño del sistema de ED lograron reducir la concentración final de Mn a 0.006 mg/L, representando así una remoción del 91%. En el caso de Fe, Cu, Pb y Ni, el sistema de ED exhibió eficiencias de remoción del 82%, 94%, 61% y 98%, respectivamente. Estos resultados resaltan la capacidad del sistema para eliminar diversos tipos de EPT de manera efectiva.

6.2. **Recomendaciones**

- I. Se sugiere evaluar el sistema de ED bajo concentraciones más elevadas de As y de los diferentes EPT, para evaluar la eficiencia de remoción de los diferentes contaminantes, ya que las concentraciones iniciales influyen en los sistemas de remoción de contaminantes.
- II. Se recomienda implementar diferentes métodos de pretratamiento destinados a reducir los niveles de turbidez en el agua, Esta medida se plantea con el objetivo de prolongar la vida útil de las membranas y optimizar el rendimiento general del sistema.
- III. Se sugiere incrementar el número de membranas en el sistema de ED con el propósito de investigar la posible influencia de la cantidad de membranas en la eficiencia de remoción de EPT. Este análisis debe contemplar los diversos parámetros de diseño previamente evaluados, tales como caudal, voltaje, volumen y porcentaje de recuperación, además de introducir nuevos factores, como el tiempo de operación.
- IV. Dado el bajo consumo energético del sistema de ED, se propone la instalación de un sistema de paneles solares como fuente de suministro de energía. Esta recomendación se basa en la capacidad de los paneles solares para proporcionar una fuente sostenible y renovable, lo que permitirá la aplicabilidad del sistema de ED en áreas remotas donde la disponibilidad de suministro de energía es limitada y poco confiable.
- V. Se recomienda llevar a cabo un monitoreo periódico de los diversos EPT al pasar el agua a través del sistema de ED, especialmente si se cuenta con los recursos necesarios. En tal caso, se debe tener presente que será necesario trabajar con cantidades de volúmenes superiores.

Referencias

- Abejón, A., Garea, A., & Irabien, A. (2015). Arsenic removal from drinking water by reverse osmosis: Minimization of costs and energy consumption. *Separation and Purification Technology*, *144*, 46–53. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2015.02.017>
- Adelodun, B., Ajibade, F. O., Ighalo, J. O., Odey, G., Ibrahim, R. G., Kareem, K. Y., Bakare, H. O., Tihamiyu, A. G. O., Ajibade, T. F., Abdulkadir, T. S., Adeniran, K. A., & Choi, K. S. (2021). Assessment of socioeconomic inequality based on virus-contaminated water usage in developing countries: A review. *Environmental Research*, *192*. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110309>
- Agbasi, J. C., Chukwu, C. N., Nweke, N. D., Uwajingba, H. C., Khan, M. Y. A., & Egbueri, J. C. (2023). Water pollution indexing and health risk assessment due to PTE ingestion and dermal absorption for nine human populations in Southeast Nigeria. *Groundwater for Sustainable Development*, *21*. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2023.100921>
- Ahmed, S. F., Kumar, P. S., Rozbu, M. R., Chowdhury, A. T., Nuzhat, S., Rafa, N., Mahlia, T. M. I., Ong, H. C., & Mofijur, M. (2022). Heavy metal toxicity, sources, and remediation techniques for contaminated water and soil. *Environmental Technology and Innovation*, *25*. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.102114>
- Akin, I., Arslan, G., Tor, A., Cengeloglu, Y., & Ersoz, M. (2011). Removal of arsenate [As(V)] and arsenite [As(III)] from water by SWHR and BW-30 reverse osmosis. *Desalination*, *281*(1), 88–92. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.07.062>
- ARCA. (2014). *LEY ORGANICA DE RECURSOS HIDRICOS USOS Y APROVECHAMIENTO DEL AGUA*. www.lexis.com.ec
- Aziz, H. A., Adlan, M. N., & Ariffin, K. S. (2008). Heavy metals (Cd, Pb, Zn, Ni, Cu and Cr(III)) removal from water in Malaysia: Post treatment by high quality limestone. *Bioresource Technology*, *99*(6), 1578–1583. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2007.04.007>

- Barakat, M. A. (2011). New trends in removing heavy metals from industrial wastewater. In *Arabian Journal of Chemistry* (Vol. 4, Issue 4, pp. 361–377).
<https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2010.07.019>
- Bilici Baskan, M., & Pala, A. (2010). A statistical experiment design approach for arsenic removal by coagulation process using aluminum sulfate. *Desalination*, 254(1–3), 42–48.
<https://doi.org/10.1016/j.desal.2009.12.016>
- Cañas Kurz, E. E., Hellriegel, U., Figoli, A., Gabriele, B., Bundschuh, J., & Hoinkis, J. (2021). Small-scale membrane-based arsenic removal for decentralized applications—Developing a conceptual approach for future utilization. In *Water Research* (Vol. 196). Elsevier Ltd.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.116978>
- Celi, A., Gerardo, B., Patiño, A., & Del Cisne, L. (2020). *Evaluación de la concentración de arsénico en matrices acuosas del río piloto, Cantón Santa Rosa, El Oro, Ecuador, período 2019-2020*.
- Chen, Q., Yao, Y., Li, X., Lu, J., Zhou, J., & Huang, Z. (2018). Comparison of heavy metal removals from aqueous solutions by chemical precipitation and characteristics of precipitates. *Journal of Water Process Engineering*, 26, 289–300.
<https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2018.11.003>
- Choong, T. S. Y., Chuah, T. G., Robiah, Y., Gregory Koay, F. L., & Azni, I. (2007). Arsenic toxicity, health hazards and removal techniques from water: an overview. *Desalination*, 217(1–3), 139–166. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.01.015>
- Dilaver, M., Dursun Celebi, M., Agtas, M., & Koyuncu, I. (2022). Brackish water RO concentrate treatment and water recovery using cost lowering integrated technology. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(5). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108463>
- Espinoza, M., & Franco, K. (2022). *Diseño de un sistema de tratamiento avanzado descentralizado de agua para fines de desalinización en la comunidad de Chanduy, zona semi-árida de la provincia de Santa Elena*.

- Fazal, M. A., Kawachi, T., & Ichion, E. (2001). Extent and severity of groundwater arsenic contamination in Bangladesh. *Water International*, 26(3), 370–379.
<https://doi.org/10.1080/02508060108686929>
- Flora, J. R. V. (1993). Stochastic approach to modeling surface fouling of ultrafiltration membranes. In *Journal of Membrane Science* (Vol. 76).
- GAD Santa Rosa. (2019). *PLAN DE DESARROLLO Y ORDENAMIENTO TERRITORIAL DEL CANTÓN SANTA ROSA – EL ORO*.
- GAD Santa Rosa. (2021). *Cuenca alta del río Santa Rosa Declarada primer área de protección hídrica de la provincia de El Oro y región sur del país*.
<http://www.santarosa.gob.ec/web/2021/01/26/cuenca-alta-del-rio-santa-rosa-declarada-primer-area-de-proteccion-hidrica-de-la-provincia-de-el-oro-y-region-sur-del-pais/>
- García, A., & Alvarez, E. (2002). Sorption of Zn, Cd and Cr on calcite. Application to purification of industrial wastewaters. *Minerals Engineering*, 539–547. www.elsevier.com/locate/mineng
- Gonzalez, A., Grágeda, M., & Ushak, S. (2017). Assessment of pilot-scale water purification module with electrodialysis technology and solar energy. *Applied Energy*, 206, 1643–1652.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.09.101>
- INEC. (2010). *Censo Ecuador 2010*.
- INEN. (2020). Norma Técnica Ecuatoriana. *INEN 1108 Sexta Revisión - Agua Para Consumo Humano*.
- Ingallinella, A. V. A., Fernández, P., Vidoni, R., & Sanguinetti, G. (2011). Simultaneous removal of arsenic and fluoride from groundwater by coagulation-adsorption with polyaluminum chloride. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 46(11), 1288–1296.
<https://doi.org/10.1080/10934529.2011.598835>
- Jadhav, S. V., Bringas, E., Yadav, G. D., Rathod, V. K., Ortiz, I., & Marathe, K. V. (2015). Arsenic and fluoride contaminated groundwaters: A review of current technologies for contaminants removal. In *Journal of Environmental Management* (Vol. 162, pp. 306–325). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.07.020>

- Jamaly, S., Darwish, N. N., Ahmed, I., & Hasan, S. W. (2014). A short review on reverse osmosis pretreatment technologies. In *Desalination* (Vol. 354, pp. 30–38). Elsevier.
<https://doi.org/10.1016/j.desal.2014.09.017>
- Jiménez-Oyola, S., Chavez, E., García-Martínez, M. J., Ortega, M. F., Bolonio, D., Guzmán-Martínez, F., García-Garizabal, I., & Romero, P. (2021). Probabilistic multi-pathway human health risk assessment due to heavy metal(loid)s in a traditional gold mining area in Ecuador. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 224.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112629>
- Karimi, L., Ghassemi, A., & Zamani Sabzi, H. (2018). Quantitative studies of electrodialysis performance. *Desalination*, 445, 159–169. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2018.07.034>
- Kongsricharoern, N., & Polprasert, C. (1995). Electrochemical precipitation of chromium (Cr⁶⁺) from an electroplating wastewater. *Water Science and Technology*, 31(9), 109–117.
[https://doi.org/10.1016/0273-1223\(95\)00412-G](https://doi.org/10.1016/0273-1223(95)00412-G)
- Liu, L., & Cheng, Q. (2020). Mass transfer characteristic research on electrodialysis for desalination and regeneration of solution: A comprehensive review. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 134). Elsevier Ltd.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110115>
- Malaeb, L., & Ayoub, G. M. (2011). Reverse osmosis technology for water treatment: State of the art review. In *Desalination* (Vol. 267, Issue 1, pp. 1–8).
<https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.09.001>
- Malek, P., Ortiz, J. M., & Schulte-Herbrüggen, H. M. A. (2016). Decentralized desalination of brackish water using an electrodialysis system directly powered by wind energy. *Desalination*, 377, 54–64. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2015.08.023>
- Mazumder, D., & Dasgupta, U. B. (2011). Chronic arsenic toxicity: Studies in West Bengal, India. In *Kaohsiung Journal of Medical Sciences* (Vol. 27, Issue 9, pp. 360–370).
<https://doi.org/10.1016/j.kjms.2011.05.003>

- McGovern, R. K., Zubair, S. M., & Lienhard V, J. H. (2014). The benefits of hybridising electro dialysis with reverse osmosis. *Journal of Membrane Science*, 469, 326–335. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2014.06.040>
- Mendoza, R. M. O., Kan, C. C., Chuang, S. S., Pingul-Ong, S. M. B., Dalida, M. L. P., & Wan, M. W. (2014). Feasibility studies on arsenic removal from aqueous solutions by electro dialysis. *Journal of Environmental Science and Health - Part A Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*, 49(5), 545–554. <https://doi.org/10.1080/10934529.2014.859035>
- Mohammadi, R., Tang, W., & Sillanpää, M. (2021). A systematic review and statistical analysis of nutrient recovery from municipal wastewater by electro dialysis. In *Desalination* (Vol. 498). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114626>
- Montes-Hernandez, G., Concha-Lozano, N., Renard, F., & Quirico, E. (2009). Removal of oxyanions from synthetic wastewater via carbonation process of calcium hydroxide: Applied and fundamental aspects. *Journal of Hazardous Materials*, 166(2–3), 788–795. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.11.120>
- Naderi Beni, A., Ghofrani, I., Nouri-Borujerdi, A., Moosavi, A., & Warsinger, D. M. (2024). Membrane properties overview in integrated forward osmosis/osmotically assisted reverse osmosis systems. *Desalination*, 569. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2023.117008>
- Nasab, H., Rajabi, S., Eghbalian, M., Malakootian, M., Hashemi, M., & Mahmoudi-Moghaddam, H. (2022). Association of As, Pb, Cr, and Zn urinary heavy metals levels with predictive indicators of cardiovascular disease and obesity in children and adolescents. *Chemosphere*, 294. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.133664>
- Nations, U. (2015). Transforming our world: The 2030 agenda for sustainable development. *New York: United Nations, Department of Economic and Social Affairs*.
- Nazari, Y., & Abbasnejad, A. (2015). Determining the Origin and Distribution of Arsenic in Groundwater in the Rayen Plain (Southeast of Kerman) using Statistical Techniques. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 24(94 (زیست محیط و مهندسی شناسی زمین-94)), 117–128. <https://doi.org/10.22071/gsj.2015.43264>

- Oh, J. I., Yamamoto, K., Kitawaki, H., Nakao, S., Sugawara, T., Rahmarl, M. M., & Rahman, M. H. (2000). Application of low-pressure nanofiltration coupled with a bicycle pump for the treatment of arsenic-contaminated groundwater. In *Desalination* (Vol. 132).
- OMS. (2008). *Guidelines for Drinking-water Quality THIRD EDITION INCORPORATING THE FIRST AND SECOND ADDENDA Volume 1 Recommendations Geneva 2008 WHO Library Cataloguing-in-Publication Data*.
- OMS. (2017). *Guidelines for Drinking-water Quality FOURTH EDITION INCORPORATING THE FIRST ADDENDUM*.
- Ortega, A., Oliva, I., Contreras, K. E., González, I., Cruz-Díaz, M. R., & Rivero, E. P. (2017). Arsenic removal from water by hybrid electro-regenerated anion exchange resin/electrodialysis process. *Separation and Purification Technology*, 184, 319–326. <https://doi.org/10.1016/J.SEPPUR.2017.04.050>
- Ospina, C., & Pinilla, Á. (2008). Desarrollo de una bomba recíproca de doble efecto para desalinización de agua por medio de ósmosis inversa. *Revista de Ingeniería*, 27, 49–55.
- Pál, L., Jenei, T., McKee, M., Kovács, N., Vargha, M., Bufa-Dórr, Z., Muhollari, T., Bujdosó, M. O., Sándor, J., & Szűcs, S. (2022). Health and economic gain attributable to the introduction of the World Health Organization's drinking water standard on arsenic level in Hungary: A nationwide retrospective study on cancer occurrence and ischemic heart disease mortality. *Science of the Total Environment*, 851. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158305>
- Pallier, V., Feuillade-Cathalifaud, G., Serpaud, B., & Bollinger, J. C. (2010). Effect of organic matter on arsenic removal during coagulation/flocculation treatment. *Journal of Colloid and Interface Science*, 342(1), 26–32. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2009.09.068>
- Patel, S. K., Qin, M., Walker, W. S., & Elimelech, M. (2020). Energy Efficiency of Electro-Driven Brackish Water Desalination: Electrodialysis Significantly Outperforms Membrane Capacitive Deionization. *Environmental Science and Technology*, 54(6), 3663–3677. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b07482>
- Pezeshki, H., Hashemi, M., & Rajabi, S. (2023). Removal of arsenic as a potentially toxic element from drinking water by filtration: A mini review of nanofiltration and reverse osmosis

techniques. In *Heliyon* (Vol. 9, Issue 3). Elsevier Ltd.

<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14246>

Pham, M. T., Nishihama, S., & Yoshizuka, K. (2021). Effect of Operational Conditions on Arsenic Removal from Aqueous Solution Using Electrodialysis. *Solvent Extraction and Ion Exchange*, 39(5–6), 655–667. <https://doi.org/10.1080/07366299.2021.1876987>

Qasim, M., Badrelzaman, M., Darwish, N. N., Darwish, N. A., & Hilal, N. (2019). Reverse osmosis desalination: A state-of-the-art review. In *Desalination* (Vol. 459, pp. 59–104). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2019.02.008>

Sedighi, M., Behvand Usefi, M. M., Ismail, A. F., & Ghasemi, M. (2023). Environmental sustainability and ions removal through electrodialysis desalination: Operating conditions and process parameters. In *Desalination* (Vol. 549). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2022.116319>

Selatile, M. K., Ray, S. S., Ojijo, V. O., & Sadiku, R. (2018). Recent developments in polymeric electrospun nanofibrous membranes for seawater desalination. *RSC Advances*, 8, 37915–37938. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:105031927>

Tee, P. F., Abdullah, M. O., Tan, I. A. W., Rashid, N. K. A., Amin, M. A. M., Nolasco-Hipolito, C., & Bujang, K. (2016). Review on hybrid energy systems for wastewater treatment and bio-energy production. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 54, pp. 235–246). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.011>

Urdánigo, D., & Verdezoto, S. (2023). *Optimización del sistema avanzado de tratamiento de agua, II etapa, con fines de desalinización en la comunidad de Chanduy.*

Zhou, Q., Yang, N., Li, Y., Ren, B., Ding, X., Bian, H., & Yao, X. (2020). Total concentrations and sources of heavy metal pollution in global river and lake water bodies from 1972 to 2017. *Global Ecology and Conservation*, 22. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e00925>

Apéndices

Apéndice A: Especificaciones técnicas

001. Limpieza de terreno

- Descripción

La limpieza de terreno tiene como finalidad preparar el área para la construcción del sistema de tratamiento avanzado para la remoción de As en el agua. Incluye la remoción de vegetación, residuos y obstrucciones que puedan interferir con la instalación y funcionamiento del sistema

- Detalles constructivos

Retiro de vegetación existente, incluyendo árboles, arbustos y maleza. Eliminación de escombros, piedras sueltas y otros elementos no deseados.

Identificación de materiales y equipos

- Equipos:

- Maquinaria pesada (excavadoras, niveladoras)
- Herramientas manuales (palas, rastrillos)

- Materiales

- Bolsas de residuos para desechos vegetales

- Medición y pago

La medición se realizará en función del área total limpiada, expresada en m². El pago se realizará de acuerdo con la cantidad de m² limpiados.

002. Replanteo y nivelación de terreno

- Descripción:

El replanteo y nivelación del terreno tienen como finalidad establecer las dimensiones precisas del área de construcción y garantizar una superficie nivelada para la instalación del sistema de tratamiento de agua. Incluye la marcación de límites, elevaciones y puntos de referencia, así como la nivelación del terreno según las especificaciones del diseño.

- Detalles constructivos:

Establecimiento de puntos de referencia para los límites del proyecto. Utilización de instrumentos topográficos para garantizar la precisión en las mediciones.

- Equipos:

Estación total o nivel láser para replanteo

Maquinaria pesada (niveladoras, si es necesario)

- Materiales:

Estacas y cintas para el marcado

Material para la señalización y protección de las áreas replanteadas

- Medición y pago:

La medición se realizará en función del área total replanteadada y nivelada, expresada en m².

El pago se efectuará según la cantidad de m² trabajados.

003. Movimiento de tierra

- Descripción:

El movimiento de tierra tiene como propósito adecuar la topografía del terreno para la construcción de las instalaciones del sistema de tratamiento de agua, mediante excavación y desalojo controlado de material. Incluye la excavación de áreas determinadas, desalojo del material excavado y el esponjamiento necesario para la conformación del terreno.

- Detalles constructivos:

Uso de maquinaria pesada, como retroexcavadoras, para la remoción del suelo. Transporte y disposición adecuada de material excavado en áreas designadas. Control de esponjamiento para evitar asentamiento inadecuados del suelo.

- Equipos:

- Retroexcavadoras u otra maquinaria de excavación
- Camiones volquete para transporte del material

- Materiales:

- Material excavado (según la clasificación del suelo)

- Medición y pago:

La medición se realizará en función del volumen de tierra movida, expresado en m³. El pago se efectuará de acuerdo con la cantidad de m³ excavados.

004. Geotecnia y estudios de suelo

- Descripción:

Realizar estudios geotécnicos son necesarios para comprender las características físicas y mecánicas del suelo en la ubicación del proyecto. Incluye la perforación de sondeos, muestreo de suelo, análisis de muestras y la generación de informes geotécnicos.

- Detalles constructivos:

Utilización de equipos especializados para realizar perforaciones en puntos estratégicos del terreno. Profundidad de las perforaciones de acuerdo con los requerimientos del estudio. Recolección de muestras representativas en diferentes estratos del suelo. Identificación y registro detallado de las características observadas durante el muestreo. Envío de las muestras al laboratorio para análisis geotécnicos. Evaluación de parámetros como granulometría, densidad resistencia y permeabilidad.

- Equipos:

- Perforadoras de suelo
- Herramientas de muestreo
- Equipos de laboratorio para análisis de suelos

- Materiales:

- Tubos de muestras
- Envases para el transporte seguro de muestras

- Medición y pago:

La medición y el pago se efectuará en función de la cantidad de sondeos perforados y muestras analizadas.

005. Cimentación y estructura principal

- Descripción:

Establecimiento de bases sólidas y la estructura necesaria para soportar el sistema de tratamiento avanzado para la remoción de As en el agua. El alcance incluye la cimentación, estructura principal y elementos asociados para el soporte de equipo.

- Detalles constructivos:
 - Cimentación: Excavación para la ubicación de las bases de concreto. Vertido de concreto de resistencia adecuada para la carga del equipo.
 - Estructura principal: uso de acero estructural para la creación de la estructura principal. Diseño modular y resistente para soportar las cargas del sistema
 - Elementos asociados: plataformas de accesos seguras y escaleras si es necesario. Disposición para la instalación de la planta de ED y equipos asociados.
- Equipos:
 - Equipos de construcción para excavación y vertido de concreto
 - Herramientas de soldadura y corte para trabajos con acero
- Materiales:
 - Concreto de alta resistencia
 - Acero estructural
 - Materiales de fijación y anclaje
- Medición y pago:

La medición se basará en la cantidad de trabajo ejecutado, considerando la extensión de la cimentación y la estructura. El pago se realizará de acuerdo a la tarifa por m².

006. Desalojo de material

- Descripción:

Retirar y disponer adecuadamente del material excavado durante las etapas de movimiento de tierra y excavación asociadas al proyecto. Incluye la carga, transporte y descarga del material excavado en lugares designados para su disposición final.
- Detalles constructivos:

- Excavación: Se llevará a cabo la excavación según los planos y especificaciones de ingeniería. El material excavado incluirá tierra, rocas u otros materiales no deseados.
- Transporte: Utilización de vehículos adecuados para el transporte del material
- Descarga: Descarga controlada en lugares autorizados o instalaciones de disposición final
- Equipos:
 - Maquinaria de excavación (excavadoras, retroexcavadoras)
 - Vehículos de transporte (volquetas, camiones)
- Materiales:
 - Material excavado durante las actividades de desbroce, nivelación y movimiento de tierra
- Medición y pago:

La medición se realizará según la cantidad de material excavado y transportado. El pago se basará en los m³ desalojados y la distancia de transporte.

007. Sistema de captación

- Descripción:

Establecimiento de un sistema de captación de agua superficial para su posterior tratamiento. Incluye la instalación de estructuras y componentes necesarios para la captación de agua.
- Detalles constructivos:
 - Elementos de captación: instalación de estructuras de toma de agua, como vertederos
 - Conducción inicial: Empleo de mallas o rejillas para evitar la entrada de objetos indeseados que tenga un impacto negativo sobre el sistema de tratamiento
- Equipos:
 - Herramientas para la instalación de estructuras y componentes
 - Equipos de medición para garantizar la calidad del agua captada

- Materiales:
 - Tuberías de PVC
- Medición y pago:

La medición y el pago se realizará en función de la longitud total de las tuberías en m, y la complejidad de las estructuras de captación.

008. Acero de refuerzo

- Descripción:
 - Reforzamiento de estructuras de hormigón para garantizar la resistencia y durabilidad. Incluye la instalación de varillas de acero de refuerzo en elementos constructivos sujetos a esfuerzos y tensiones
- Detalles constructivos:
 - Selección de varillas: empleo de varillas corrugadas, con características adecuadas a los requerimientos estructurales, $f_y=4200 \text{ kg/cm}^2$
 - Anclajes y empalmes: utilización de anclajes para fijar las varillas en las ubicaciones predeterminadas.
- Equipos:
 - Herramientas de corte y doblado para adaptar las barras según las necesidades del proyecto.
- Materiales:
 - Varillas de acero corrugado con certificaciones que cumplan con las normativas de resistencia y calidad
- Medición y pago:

La medición y el pago se realizará en función de la cantidad y longitud de las barras de acero utilizadas.

009. Hormigón

- Descripción:

Preparación y aplicación de mezcla de hormigón para la construcción de elementos estructurales. Incluye la dosificación, mezcla, transporte y colocación del hormigón en áreas designadas.

- Detalles constructivos:
 - Dosificación: cumplir con las proporciones especificadas en el diseño estructural. Ajustar la dosificación según las condiciones climáticas y de trabajo
 - Mezcla: empleo de mezcladora controlada para garantizar uniformidad. Monitoreo constante de la consistencia y trabajabilidad del hormigón
 - Colocación: utilización de métodos que aseguren la correcta distribución y compactación. Evitar segregación y pérdida de trabajabilidad durante la colocación.
- Equipos:
 - Mezcladora de hormigón
 - Bomba o equipo de transporte
- Materiales:
 - Cemento, agregados (arena, grava), agua y aditivos de calidad certificada
 - Refuerzo de varillas de acero
- Medición y pago:

La medición y el pago se realizará según los volúmenes de hormigón colocado en m³.

010. Instalación de tuberías

- Descripción:

Establecimiento del sistema de transporte de agua tratada en el sistema de electrodiálisis. Incluye la instalación de tuberías principales, secundarias y conexiones para garantizar la circulación de fluidos en el sistema.
- Detalles constructivos:
 - Selección de tuberías: utilización de materiales resistentes a la corrosión y compatibles con el agua tratada y demás fluidos del proceso. Diámetros de tubería adecuados para el caudal y la presión especificados en el diseño.

- Conexiones: uso de accesorios y juntas para asegurar conexiones. Soldaduras o métodos de unión según las recomendaciones del fabricante
- Equipos:
 - Herramientas estándar de fontanería
 - Herramientas de corte y soldadura específicas para el tipo de tubería
- Materiales:
 - Tuberías PVC
 - Accesorios, juntas y elementos de fijación
- Medición y pago:

La medición y el pago se realizará en función de la longitud y tipo de tubería instalada, así como la cantidad y calidad de accesorios.

011. Sistema de bombeo

- Descripción:

Implementación de un sistema de bombeo que garantice un caudal constante y controlado para el proceso de electrodiálisis. Incluye la selección, instalación y operación de bombas que cumplan con los requisitos de caudal y presión establecidos en el diseño de sistema.
- Detalles constructivos:
 - Selección de bombas: Elección de bombas peristálticas, según las necesidades del sistema. Especificación de bombas con capacidad de ajuste de velocidad para el control de caudal.
- Equipos:
 - Sensores de presión y caudal de alta precisión
- Materiales:
 - Bombas peristálticas
 - Tuberías y conexiones resistentes a la corrosión
 - Válvulas y accesorios según las especificaciones del diseño
- Medición y pago:

La medición se realizará en base al rendimiento del sistema de bombeo y caudal. El pago se calculará en función de las mediciones realizadas.

012. Sistema de electrodiálisis

- Descripción:

Implementación un sistema de ED para la remoción de As del agua superficial. Incluye la instalación y operación de membranas selectivas, electrodos y otros componentes necesarios para el proceso electroquímico.

- Detalles constructivos:

- Membranas selectivas: utilización de membranas de intercambio iónico de alta selectividad para el As.
- Electrodo: empleo de electrodos de materiales conductores y resistencia a la corrosión
- Sistema de celda: diseño de celdas electroquímicas para facilitar la transferencia iónica entre las membranas

- Equipos:

- Celdas electroquímicas

- Materiales:

- Membranas de intercambio iónico
- Electrodo

- Medición y pago:

La medición y el pago se basará en los m³ de agua trata por el sistema.

013. Suministro de energía

- Descripción:

Suministrar energía eléctrica de manera estable y asegura para el funcionamiento continuo del sistema de ED. Implementación de una fuente de energía capaz de proporcionar la potencia necesaria para la operación del sistema. Aseguramiento de la conexión eléctrica adecuada entre la fuente de energía y los electrodos del sistema de ED.

- Detalles constructivos:
 - Fuente de energía: Selección de una fuente de energía confiable. Instalación de protección, como interruptores y fusibles para garantizar la seguridad del sistema eléctrico
- Equipos:
 - Fuente de energía eléctrica
 - Componentes de control y monitoreo
- Materiales:
 - Cableado eléctrico
 - Dispositivos de protección eléctrica
- Medición y pago:

La medición y el pago se basará

Apéndice B: Análisis de precios unitarios

ANALISIS DE PRECIO UNITARIO (APU)				
CÓDIGO GENERAL	FECHA DE CREACIÓN	PROYECTO		
1	5/1/2024	Diseño de sistema de ED para la remoción de As en agua		
CAPITULO		Estudios de diseño	CÓDIGO	1.1
DESCRIPCIÓN		UN	CANTIDAD	
Estudios estructurales		global	1	
1. MATERIALES				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
Estudios estructurales	global	1	1933.00	1933.00
Total materiales				1933.00
2. MANO DE OBRA				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
Total mano de obra				0.00
3. EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
Herramientas menores % M.O.			5.00%	0.39
Total equipo, maquinaria y herramientas				0.39
TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P)				1933.39
INDIRECTOS Y UTILIZADES 20%				386.678
COSTO TOTAL DEL RUBRO				2320.068
VALOR OFERTADO				2320.068

ANALISIS DE PRECIO UNITARIO (APU)				
CÓDIGO GENERAL	FECHA DE CREACIÓN		PROYECTO	
1	5/1/2024		Diseño de sistema de ED para la remoción de As en agua	
CAPITULO				
	Estudios de diseño		CÓDIGO	1.2
DESCRIPCIÓN				
Estudios hidráulicos		UN	CANTIDAD	
		global	1	
1. MATERIALES				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
Estudios hidráulicos	global	1	86.25	86.25
Total materiales				86.25
2. MANO DE OBRA				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
Total mano de obra				0.00
3. EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
Herramientas menores % M.O.			5.00%	0.39
Total equipo, maquinaria y herramientas				0.39
TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P)				86.64
INDIRECTOS Y UTILIZADES 20%				17.328
COSTO TOTAL DEL RUBRO				103.968
VALOR OFERTADO				103.968

ANALISIS DE PRECIO UNITARIO (APU)				
CÓDIGO GENERAL	FECHA DE CREACIÓN		PROYECTO	
1	5/1/2024		Diseño de sistema de ED para la remoción de As en agua	
CAPITULO	Estudios de diseño		CÓDIGO	1.3
DESCRIPCIÓN		UN	CANTIDAD	
Estudios de suelos		global	1	
1. MATERIALES				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
Estudios de suelos	global	1	731.98	731.98
Total materiales				731.98
2. MANO DE OBRA				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
Total mano de obra				0.00
3. EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
Herramientas menores % M.O.			5.00%	0.39
Total equipo, maquinaria y herramientas				0.39
TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P)				732.37
INDIRECTOS Y UTILIZADES 20%				146.474
COSTO TOTAL DEL RUBRO				878.844
VALOR OFERTADO				878.844

ANALISIS DE PRECIO UNITARIO (APU)				
CÓDIGO GENERAL	FECHA DE CREACIÓN		PROYECTO	
2	5/1/2024		Diseño de sistema de ED para la remoción de As en agua	
CAPITULO		Obras preliminares	CÓDIGO	2.1
DESCRIPCIÓN		UN	CANTIDAD	
Limpieza de terreno		m ²	800.00	
1. MATERIALES				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
Total materiales				0.00
2. MANO DE OBRA				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
Peón	Hora	0.29	4.05	1.15
Total mano de obra				1.15
3. EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
Herramientas menores % M.O.			5.00%	0.06
Total equipo, maquinaria y herramientas				0.06
Total Precio Unitario de Enlucido de Cisterna				13.47
TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P)				13.47
INDIRECTOS Y UTILIZADES 20%				2.694
COSTO TOTAL DEL RUBRO				16.164
VALOR OFERTADO				16.164

Rendimiento 0.28 horas/m²

ANALISIS DE PRECIO UNITARIO (APU)				
CÓDIGO GENERAL	FECHA DE CREACIÓN	PROYECTO		
2	5/1/2024	Diseño de sistema de ED para la remoción de As en agua		
CAPITULO	Obras preliminares	CÓDIGO	2.2	
DESCRIPCIÓN		UN	CANTIDAD	
Replanteo y nivelación		m ²	800	
1. MATERIALES				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
Tiras	u	0.2	1.45	0.29
Total materiales				0.29
2. MANO DE OBRA				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
Cadenero	Hora	0.14	4.05	1.15
Topógrafo	Hora	0.14	4.55	0.64
Total mano de obra				1.15
3. EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
Teodolito	hora	0.14	6.88	0.96
Herramientas menores % M.O.			5.00%	0.06
Total equipo, maquinaria y herramientas				1.02
Total Precio Unitario de Enlucido de Cisterna				2.52
TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P)				2.52
INDIRECTOS Y UTILIZADES 20%				0.504
COSTO TOTAL DEL RUBRO				3.024
VALOR OFERTADO				3.024

Rendimiento 0.14 horas/m²

ANALISIS DE PRECIO UNITARIO (APU)				
CÓDIGO GENERAL	FECHA DE CREACIÓN		PROYECTO	
2	5/1/2024		Diseño de sistema de ED para la remoción de As en agua	
CAPITULO	Obras preliminares	CÓDIGO	2.3	
DESCRIPCIÓN	UN	CANTIDAD		
Movimiento de tierra	m ³	300		
1. MATERIALES				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
Casajo mediano/fino	m ³	1.05	7.5	7.88
Total materiales				7.88
2. MANO DE OBRA				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
Peón	Hora	1.63	4.05	6.60
Total mano de obra				6.60
3. EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
Herramientas menores % M.O.			5.00%	0.33
Total equipo, maquinaria y herramientas				0.33
TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P)				14.81
INDIRECTOS Y UTILIZADES 20%				2.962
COSTO TOTAL DEL RUBRO				17.772
VALOR OFERTADO				17.772

ANÁLISIS DE PRECIO UNITARIO (APU)				
CÓDIGO GENERAL	FECHA DE CREACIÓN	PROYECTO		
2	6/1/2024	Diseño de sistema de ED para la remoción de As en agua		
CAPITULO	Obras preliminares	CÓDIGO	2.4	
DESCRIPCIÓN	UN	CANTIDAD		
Desalojo de material	m ³	300		
1. MATERIALES				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
Total materiales				0.00
2. MANO DE OBRA				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
Peón	Hora	0.03	4.05	0.10
Operadores Equipo Pesado	Hora	0.03	4.55	0.11
Chofer profesional licencia E	Hora	0.03	5.95	0.19
Total mano de obra				0.41
3. EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
Volqueta 8 m ³	Hora	0.03	30.00	0.96
Retroexcavadora 75 HP	Hora	0.03	35.00	0.88
Herramientas menores % M.O.			5.00%	0.02
Total equipo, maquinaria y herramientas				1.86
Total Precio Unitario de Enlucido de Cisterna				2.26
TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P)				2.26
INDIRECTOS Y UTILIZADES 20%				0.452
COSTO TOTAL DEL RUBRO				2.712
VALOR OFERTADO				2.712

Rendimiento 0.03 horas/m³

ANALISIS DE PRECIO UNITARIO (APU)				
CÓDIGO GENERAL	FECHA DE CREACIÓN		PROYECTO	
3	6/1/2024		Diseño de sistema de ED para la remoción de As en agua	
CAPITULO	Construcción e instalaciones		CÓDIGO	3.1
DESCRIPCIÓN		UN	CANTIDAD	
Caseta de operaciones		m ²	1	
1. MATERIALES				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
Tabla dura de encofrado de 0.20 m	u	5.00	4.72	23.60
Cuartón 4 x 2	u	2.00	1.40	3.00
Estilpanel/paredes galvalume AR/5 e= 0.4mm	m ²	1.10	10.98	12.08
Clavos	kg	0.40	1.03	0.41
Tiras 2.5x2.5x250	u	2.00	0.38	0.76
Viga de madera tratada 15x15 cm	m2	0.50	3.00	1.50
Alfajia 6x6x250 cm	u	1.00	2.50	2.50
Total materiales				43.85
2. MANO DE OBRA				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
Peón	Hora	2.00	4.05	8.10
Albañil	Hora	1.00	4.10	4.10
Maestro de Obra	Hora	0.50	4.33	2.17
Total mano de obra				14.37
3. EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
Herramientas menores % M.O.			5.00%	0.72
Total equipo, maquinaria y herramientas				0.72
Total Precio Unitario de Enlucido de Cisterna				58.93
TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P)				58.93
INDIRECTOS Y UTILIZADES 20%				11.786
COSTO TOTAL DEL RUBRO				70.716
VALOR OFERTADO				70.716

ANALISIS DE PRECIO UNITARIO (APU)				
CÓDIGO GENERAL	FECHA DE CREACIÓN	PROYECTO		
3	6/1/2024	Diseño de sistema de ED para la remoción de As en agua		
CAPITULO	Construcción e instalaciones	CÓDIGO	3.2	
DESCRIPCIÓN	UN	CANTIDAD		
Hormigón simple replantillo fc=140 kg/cm2	m ³	250		
1. MATERIALES				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
Cemtno Fuerte Tipo GU Saco 50 Kg	saco	6.18	7.68	47.46
Arena	m ³	0.65	13.50	8.78
Ripio	m ³	0.95	18.00	17.10
Agua	m ³	0.24	0.85	0.20
Total materiales				73.54
2. MANO DE OBRA				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
Peón	Hora	9.00	4.05	36.45
Albañil	Hora	2.00	4.10	8.20
Total mano de obra				44.65
3. EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
Concretera 1 saco	Hora	1.00	4.48	4.48
Herramientas menores % M.O.			5.00%	2.23
Total equipo, maquinaria y herramientas				6.71
TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P)				124.90
INDIRECTOS Y UTILIZADES 20%				24.98
COSTO TOTAL DEL RUBRO				149.88
VALOR OFERTADO				149.88

Rendimiento 1.0000 horas/m³

ANÁLISIS DE PRECIO UNITARIO (APU)				
CÓDIGO GENERAL	FECHA DE CREACIÓN	PROYECTO		
3	6/1/2024	Diseño de sistema de ED para la remoción de As en agua		
CAPITULO	Construcción e instalaciones	CÓDIGO	3.3	
DESCRIPCIÓN	UN	CANTIDAD		
Encofrado y desencofrado con madera	m ²	430		
1. MATERIALES				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
Tabla dura de encofrado de 0.30 m	u	0.83	5.50	4.57
Clavos	kg	0.10	1.03	0.10
Pingos	m ³	2.40	1.10	2.64
Aceite quemado	gl	0.06	0.44	0.03
Rieles para encofrado	u	0.45	2.25	1.01
Total materiales				8.35
2. MANO DE OBRA				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
Peón	Hora	1.00	4.05	4.05
Albañil	Hora	0.50	4.10	2.05
Maestro de obra	Hora	0.05	4.33	0.22
Total mano de obra				6.32
3. EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
Herramientas menores % M.O.			5.00%	0.32
Total equipo, maquinaria y herramientas				0.32
TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P)				14.98
INDIRECTOS Y UTILIZADES 20%				2.996
COSTO TOTAL DEL RUBRO				17.976
VALOR OFERTADO				17.976

Rendimiento 0.50 horas/m²

ANALISIS DE PRECIO UNITARIO (APU)				
CÓDIGO GENERAL	FECHA DE CREACIÓN	PROYECTO		
3	6/1/2024	Diseño de sistema de ED para la remoción de As en agua		
CAPITULO	Construcción e instalaciones	CÓDIGO	3.4	
DESCRIPCIÓN	UN	CANTIDAD		
Acero de refuerzo $f_y=4200 \text{ kg/cm}^2$	kg	519.77		
1. MATERIALES				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
Alambre de amarre #18	kg	0.05	1.53	0.08
Acero de refuerzo $f_y=4200 \text{ kg/cm}^2$	kg	1.05	0.81	0.85
Total materiales				0.93
2. MANO DE OBRA				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
Peón	Hora	0.05	4.05	0.20
Albañil	Hora	0.50	4.10	0.21
Total mano de obra				0.41
3. EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
Herramientas menores % M.O.			5.00%	0.02
Total equipo, maquinaria y herramientas				0.02
TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P)				1.35
INDIRECTOS Y UTILIZADES 20%				0.27
COSTO TOTAL DEL RUBRO				1.62
VALOR OFERTADO				1.62

ANALISIS DE PRECIO UNITARIO (APU)				
CÓDIGO GENERAL	FECHA DE CREACIÓN		PROYECTO	
3	6/1/2024		Diseño de sistema de ED para la remoción de As en agua	
CAPITULO		Construcción e instalaciones	CÓDIGO	3.5
DESCRIPCIÓN		UN	CANTIDAD	
Malla electrosoldada 6-10		m ²	539	
1. MATERIALES				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
Malla Armex R-283 (6.25x2.40) 6.0 mm 10x10	pln	0.07	89.98	6.25
Total materiales				6.25
2. MANO DE OBRA				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
Peón	Hora	0.07	4.05	0.27
Albañil	Hora	0.03	4.10	0.14
Total mano de obra				0.40
3. EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
Herramientas menores % M.O.			5.00%	0.02
Total equipo, maquinaria y herramientas				0.02
TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P)				6.67
INDIRECTOS Y UTILIZADES 20%				1.334
COSTO TOTAL DEL RUBRO				8.004
VALOR OFERTADO				8.004

Rendimiento

0.033 horas/m²

ANALISIS DE PRECIO UNITARIO (APU)				
CÓDIGO GENERAL	FECHA DE CREACIÓN		PROYECTO	
3	6/1/2024		Diseño de sistema de ED para la remoción de As en agua	
CAPITULO	Construcción e instalaciones		CÓDIGO	3.6
DESCRIPCIÓN		UN	CANTIDAD	
Hormigón simple $f_c= 210 \text{ kg/cm}^2$		m^3	430	
1. MATERIALES				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
Cemento fuerte Tipo GU Saco 50 kg	saco	7.21	7.68	55.37
Arena	m^3	0.65	13.50	8.78
Ripio	m^3	0.95	18.00	17.10
Agua	m^3	0.24	0.85	0.20
Total materiales				81.45
2. MANO DE OBRA				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
Peón	Hora	10.00	4.05	40.50
Albañil	Hora	2.00	4.10	8.20
Maestro de Obra	Hora	0.50	4.33	2.17
Total mano de obra				50.87
3. EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
Concreteira 1 saco	Hora	1.00	4.48	4.48
Vibrador de manguera	Hora	1.00	4.06	4.06
Herramientas menores % M.O.			5.00%	2.54
Total equipo, maquinaria y herramientas				11.08
TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P)				143.40
INDIRECTOS Y UTILIZADES 20%				28.68
COSTO TOTAL DEL RUBRO				172.08
VALOR OFERTADO				172.08

Rendimiento

1.000 horas/ m^3

ANALISIS DE PRECIO UNITARIO (APU)				
CÓDIGO GENERAL	FECHA DE CREACIÓN		PROYECTO	
3	6/1/2024		Diseño de sistema de ED para la remoción de As en agua	
CAPITULO	Construcción e instalaciones		CÓDIGO	3.7
DESCRIPCIÓN	UN	CANTIDAD		
Tubería HD desague d=400 mm	ml	130		
1. MATERIALES				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
Tubería HD desague d=400 mm	m	1.00	95.00	95.00
Total materiales				95.00
2. MANO DE OBRA				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
Plomero	Hora	1.00	3.45	3.45
Peón	Hora	2.00	6.82	6.82
Maestro de Obra	Hora	0.50	1.91	1.91
Total mano de obra				12.18
3. EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
Herramientas menores % M.O.			5.00%	0.61
Total equipo, maquinaria y herramientas				0.61
TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P)				107.79
INDIRECTOS Y UTILIZADES 20%				21.558
COSTO TOTAL DEL RUBRO				129.348
VALOR OFERTADO				129.348

Rendimiento

1.000 horas/m

ANALISIS DE PRECIO UNITARIO (APU)				
CÓDIGO GENERAL	FECHA DE CREACIÓN		PROYECTO	
3	6/1/2024		Diseño de sistema de ED para la remoción de As en agua	
CAPITULO	Construcción e instalaciones		CÓDIGO	3.8
DESCRIPCIÓN		UN	CANTIDAD	
Sistema de pretratamiento. Filtro lento de arena de flujo descendente		u	1	
1. MATERIALES				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
Arena para filtros de agua	m3	42.00	54.19	2275.98
Grava para filtros de agua	m3	42.00	19.83	832.86
Total materiales				3108.84
2. MANO DE OBRA				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
Peón	Hora	4.00	4.54	18.16
Albañil	Hora	1.00	1.14	1.14
Total mano de obra				19.30
3. EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
Herramientas menores % M.O.			5.00%	
Total equipo, maquinaria y herramientas				1.12
TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P)				3128.14
INDIRECTOS Y UTILIZADES 20%				625.628
COSTO TOTAL DEL RUBRO				3753.768
VALOR OFERTADO				3753.768

Rendimiento

1.000 horas/m

ANALISIS DE PRECIO UNITARIO (APU)				
CÓDIGO GENERAL	FECHA DE CREACIÓN		PROYECTO	
3	6/1/2024		Diseño de sistema de ED para la remoción de As en agua	
CAPITULO	Construcción e instalaciones		CÓDIGO	3.9
DESCRIPCIÓN	UN	CANTIDAD		
Implementación de sistema de electrodiálisis	u			
1. MATERIALES				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
Stack de membranas de electrodiálisis industrial	u	1.00	13900.00	13900.00
			Total materiales	
2. MANO DE OBRA				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
			Total mano de obra	
3. EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
Herramientas menores % M.O.			5.00%	695
			Total equipo, maquinaria y herramientas	695
			TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P)	14595.00
			INDIRECTOS Y UTILIZADES 20%	2919
			COSTO TOTAL DEL RUBRO	17514
			VALOR OFERTADO	17514

ANALISIS DE PRECIO UNITARIO (APU)				
CÓDIGO GENERAL	FECHA DE CREACIÓN		PROYECTO	
3	6/1/2024		Diseño de sistema de ED para la remoción de As en agua	
CAPITULO	3	CÓDIGO	3.10	
DESCRIPCIÓN	UN	CANTIDAD		
Intalaciones eléctricas	u			
1. MATERIALES				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
Instalaciones eléctricas de planta de tratamiento	glb	1.00	11965.00	11965.00
Total materiales				11965.00
2. MANO DE OBRA				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
Peón	Hora	5.00	3.41	17.05
Electricista	Hora	1.00	3.56	3.56
Supervisor Eléctrico/Sanitario general	Hora	1.00	3.83	3.83
Total mano de obra				24.44
3. EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
Herramientas menores % M.O.			5.00%	0.11
Total equipo, maquinaria y herramientas				0.11
TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P)				11989.55
INDIRECTOS Y UTILIZADES 20%				2397.91
COSTO TOTAL DEL RUBRO				14387.46
VALOR OFERTADO				14387.46

ANALISIS DE PRECIO UNITARIO (APU)				
CÓDIGO GENERAL	FECHA DE CREACIÓN		PROYECTO	
3	6/1/2024		Diseño de sistema de ED para la remoción de As en agua	
CAPITULO	Construcción e instalaciones		CÓDIGO	3.11
DESCRIPCIÓN	UN	CANTIDAD		
Tanque de regulación	u			
1. MATERIALES				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
Tanque de regulación	u	1.00	14900.00	14900.00
			Total materiales	14900.00
2. MANO DE OBRA				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
			Total mano de obra	0.00
3. EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
Herramientas menores % M.O.			5.00%	0.13
			Total equipo, maquinaria y herramientas	0.1
			TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P)	14900.10
			INDIRECTOS Y UTILIZADES 20%	2980.02
			COSTO TOTAL DEL RUBRO	17880.12
			VALOR OFERTADO	17880.12

Rendimiento

1.000 horas/m

ANALISIS DE PRECIO UNITARIO (APU)				
CÓDIGO GENERAL	FECHA DE CREACIÓN		PROYECTO	
3	6/1/2024		Diseño de sistema de ED para la remoción de As en agua	
CAPITULO		Construcción e instalaciones	CÓDIGO	3.12
DESCRIPCIÓN		UN	CANTIDAD	
Piscina de postratamiento		u		
1. MATERIALES				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
Tanque de regulación	u	1.00	2876.27	2876.27
Total materiales				2876.27
2. MANO DE OBRA				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
Total mano de obra				0.00
3. EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
Herramientas menores % M.O.			5.00%	0.13
Total equipo, maquinaria y herramientas				0.13
TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P)				2876.40
INDIRECTOS Y UTILIZADES 20%				575.28
COSTO TOTAL DEL RUBRO				3451.68
VALOR OFERTADO				3451.68

Rendimiento

1.000 horas/m

ANALISIS DE PRECIO UNITARIO (APU)				
CÓDIGO GENERAL	FECHA DE CREACIÓN		PROYECTO	
4	6/1/2024		Diseño de sistema de ED para la remoción de As en agua	
CAPITULO	Operación y mantenimiento		CÓDIGO	4.1
DESCRIPCIÓN	UN	CANTIDAD		
Sistema de bombeo	ml			
1. MATERIALES				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
Sistema de captación equipado con una bomba de superficie, con la capacidad de extraer 2250 m ³ de agua diarios	u	1.00	9949.59	9949.59
			Total materiales	9949.59
2. MANO DE OBRA				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
			Total mano de obra	
3. EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
Herramientas menores % M.O.			5.00%	
			Total equipo, maquinaria y herramientas	0.46
			TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P)	9949.59
			INDIRECTOS Y UTILIZADES 20%	1989.918
			COSTO TOTAL DEL RUBRO	11939.508
			VALOR OFERTADO	11939.508

Rendimiento

1.000

horas/m

ANALISIS DE PRECIO UNITARIO (APU)				
CÓDIGO GENERAL	FECHA DE CREACIÓN		PROYECTO	
4	6/1/2024		Diseño de sistema de ED para la remoción de As en agua	
CAPITULO	Operación y mantenimiento	CÓDIGO	4.2	
DESCRIPCIÓN	UN	CANTIDAD		
Mantenimiento de membranas	ml			
1. MATERIALES				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
Reemplazo de membranas (anual)	global	1.00	92.00	92.00
Total materiales				92.00
2. MANO DE OBRA				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
Total mano de obra				
3. EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
	Herramientas menores % M.O.		5.00%	
Total equipo, maquinaria y herramientas				0.46
TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P)				92.46
INDIRECTOS Y UTILIZADES 20%				18.492
COSTO TOTAL DEL RUBRO				110.952
VALOR OFERTADO				110.952

Rendimiento

1.000

horas/m

ANÁLISIS DE PRECIO UNITARIO (APU)				
CÓDIGO GENERAL	FECHA DE CREACIÓN		PROYECTO	
4	6/1/2024		Diseño de sistema de ED para la remoción de As en agua	
CAPITULO	Operación y mantenimiento	CÓDIGO	4.3	
DESCRIPCIÓN	UN	CANTIDAD		
Monitoreo de calidad de agua	ml			
1. MATERIALES				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
Monitoreo de calidad de agua	global	1.00	1413.44	1413.44
Total materiales				1413.44
2. MANO DE OBRA				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
Total mano de obra				
3. EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
Herramientas menores % M.O.			5.00%	
Total equipo, maquinaria y herramientas				0.1
TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P)				1413.54
INDIRECTOS Y UTILIZADES 20%				282.708
COSTO TOTAL DEL RUBRO				1696.248
VALOR OFERTADO				1696.248

Rendimiento 1.000 horas/m

ANALISIS DE PRECIO UNITARIO (APU)				
CÓDIGO GENERAL	FECHA DE CREACIÓN		PROYECTO	
5	6/1/2024		Diseño de sistema de ED para la remoción de As en agua	
CAPITULO		Plan de manejo ambiental	CÓDIGO	5.1
DESCRIPCIÓN		UN	CANTIDAD	
Inyección geológica		m3		
1. MATERIALES				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
Inyección geológica	m3	1.00	3.00	3.00
Total materiales				3.00
2. MANO DE OBRA				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
Total mano de obra				
3. EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
Herramientas menores % M.O.			5.00%	
Total equipo, maquinaria y herramientas				0.25
TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P)				3.25
INDIRECTOS Y UTILIZADES 20%				0.65
COSTO TOTAL DEL RUBRO				3.9
VALOR OFERTADO				3.9

Rendimiento

1.000

horas/m

ANÁLISIS DE PRECIO UNITARIO (APU)				
CÓDIGO GENERAL	FECHA DE CREACIÓN		PROYECTO	
5	6/1/2024		Diseño de sistema de ED para la remoción de As en agua	
CAPITULO	Plan de manejo ambiental	CÓDIGO	5.2	
DESCRIPCIÓN	UN	CANTIDAD		
Reforestación	m2			
1. MATERIALES				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
Reforestación	m2	1.00	11.63	11.63
Total materiales				11.63
2. MANO DE OBRA				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
Total mano de obra				
3. EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
Herramientas menores % M.O.			5.00%	
Total equipo, maquinaria y herramientas				0.12
TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P)				11.75
INDIRECTOS Y UTILIZADES 20%				2.35
COSTO TOTAL DEL RUBRO				14.1
VALOR OFERTADO				14.1

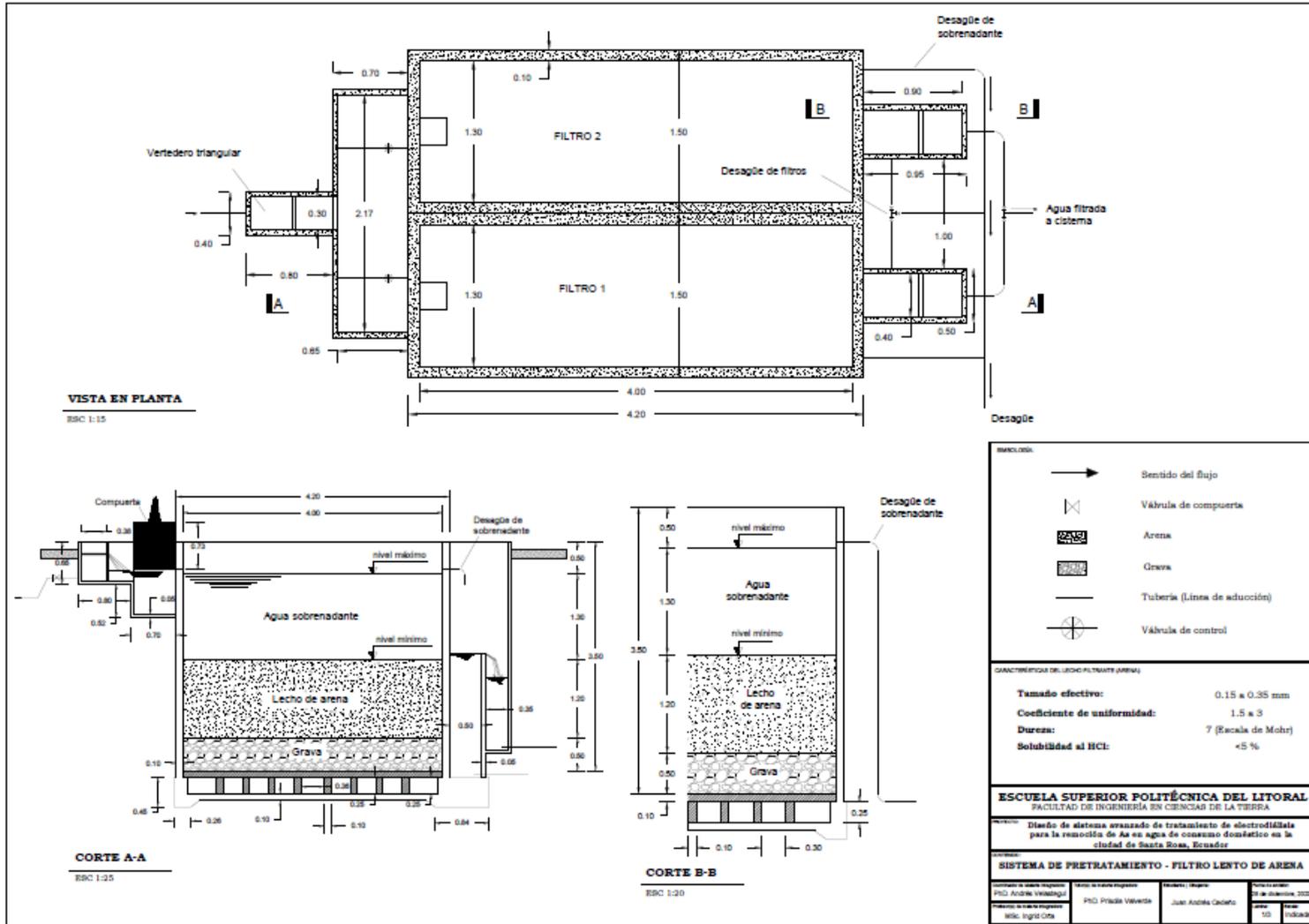
Rendimiento

1.000

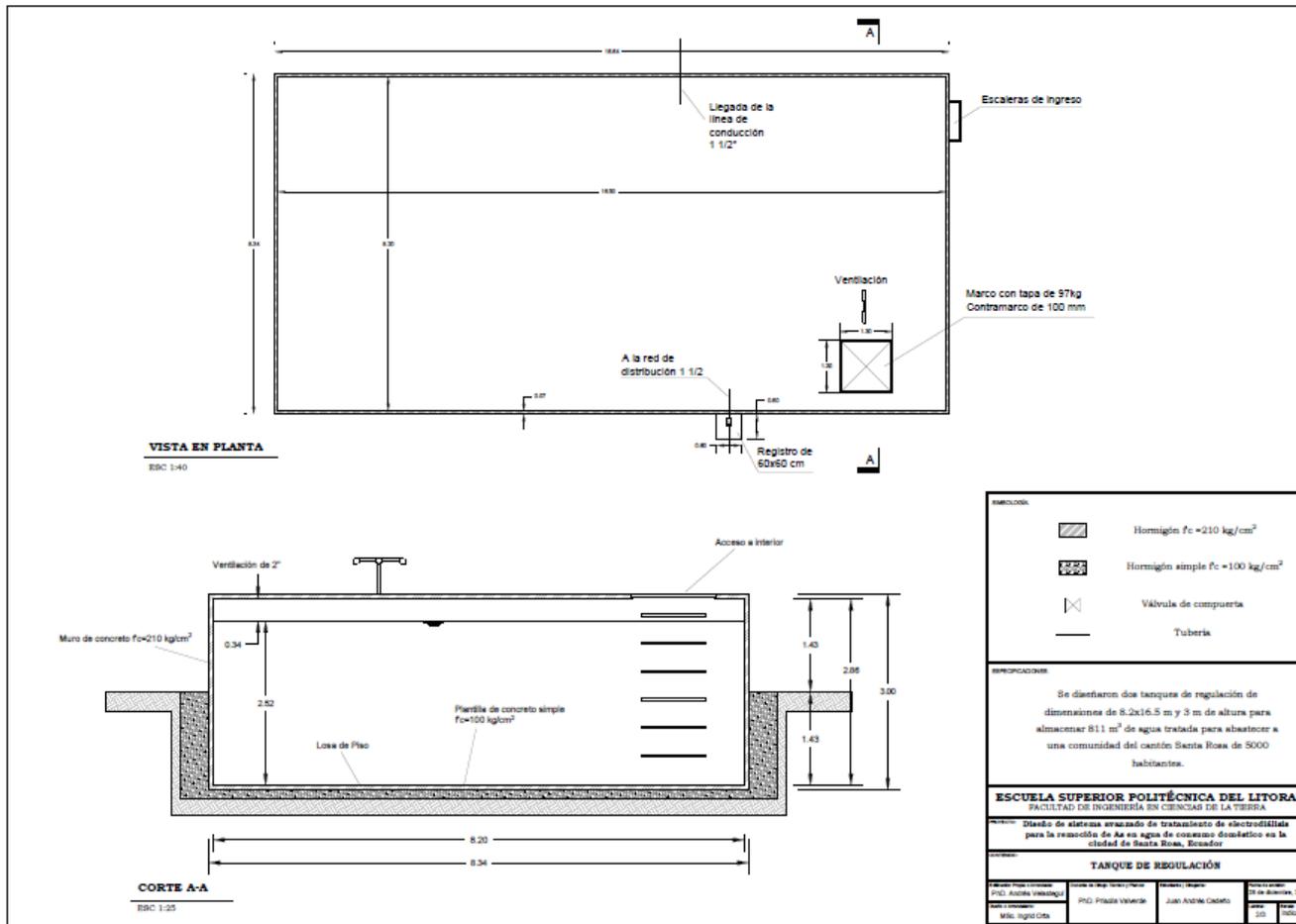
horas/m

Apéndice: Planos

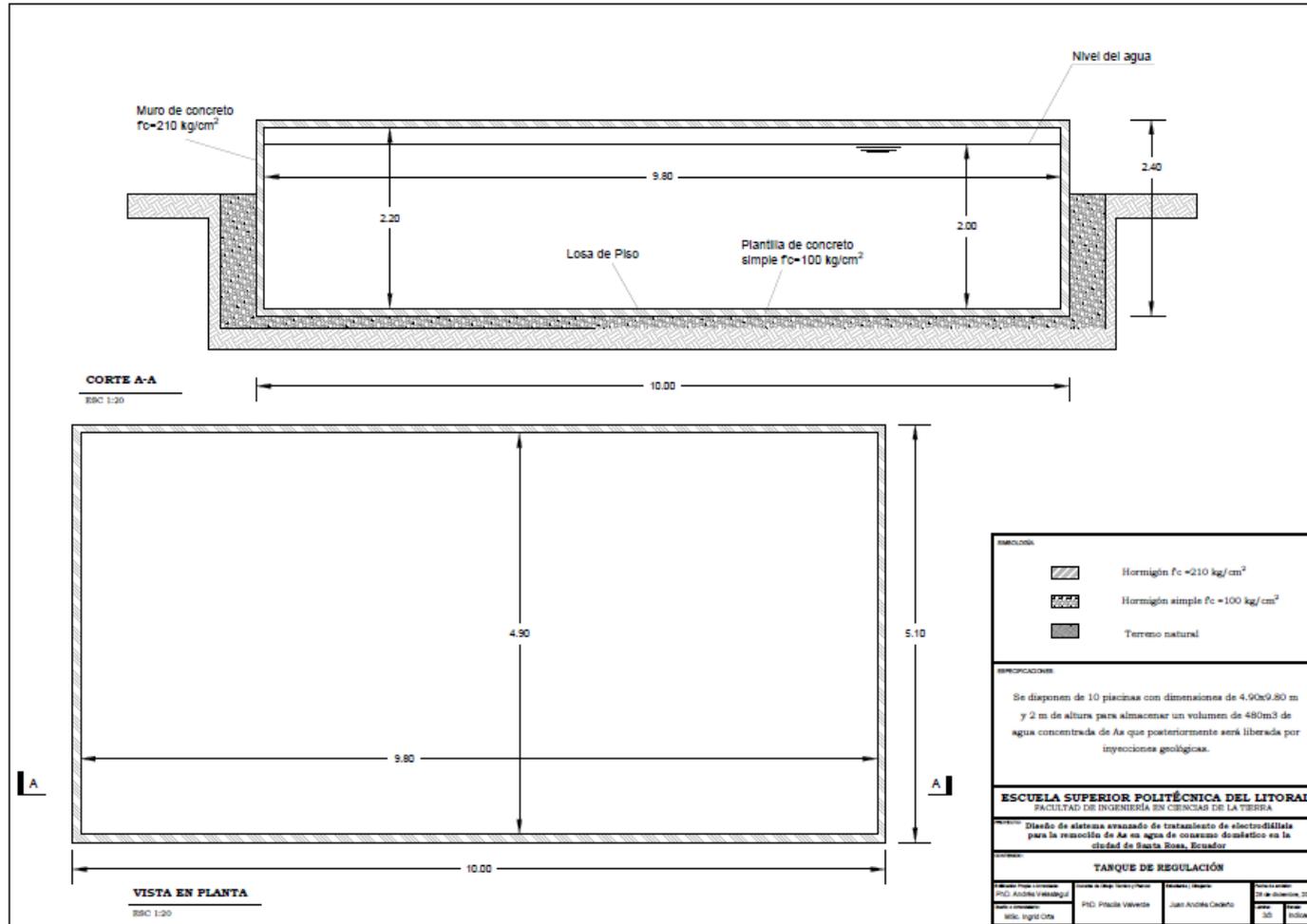
PLANO 1 Sistema de pretratamiento. Filtro lento de flujo descendente.



PLANO 2 Sistema de almacenamiento de agua tratada. Tanque de regulación.



PLANO 3 Sistema de postratamiento. Piscina de almacenamiento de agua de rechazo.



DISEÑO DE SISTEMA AVANZADO DE TRATAMIENTO DE ELECTRODIÁLISIS PARA LA REMOCIÓN DE As EN AGUA DE CONSUMO DOMÉSTICO EN LA CIUDAD DE SANTA ROSA, ECUADOR

PROBLEMA

El agua potable que se distribuye en la ciudad de Santa Rosa contiene concentraciones de As que superan los estándares recomendados para agua potable de 10 µg/L, establecidos por la OMS y la normativa nacional INEN 1108. Esto representa un potencial riesgo para la salud de la población, por lo cual es urgente y mandatorio resolver esta problemática que afecta la salud y bienestar de los habitantes.

OBJETIVO GENERAL

Diseñar el sistema de tratamiento de agua avanzado en Santa Rosa, Ecuador mediante la utilización de electrodiálisis en el proceso de tratamiento para la remoción de As del agua de captación.



Figura 1. Lugar de muestreo. Quebrada El Panteón

PROPUESTA

1. Trabajo de campo

- Identificación zona de estudio
- Recolección de muestras

2. Trabajo de laboratorio

- Caracterización hidroquímica
- Experimentación para el diseño del tratamiento con electrodiálisis

3. Análisis de resultados

- Porcentaje de remoción de As
- Energía específica del tratamiento
- Generación de residuos
- Escalabilidad y adaptabilidad

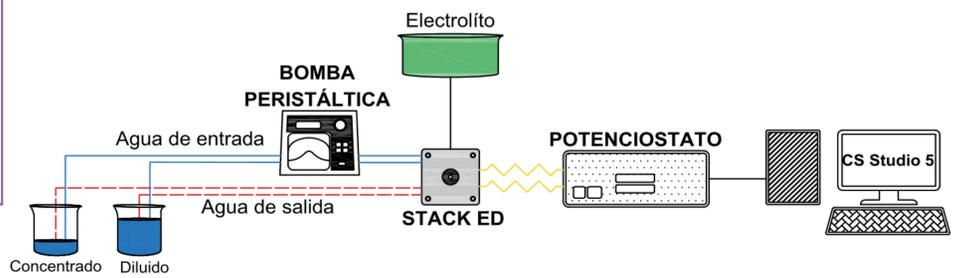


Figura 1. Esquema del sistema de tratamiento de ED

RESULTADOS

Variación de caudal

El consumo energético es proporcional al aumento de caudal. Al aumentar el caudal de 100 a 500 mL/min, V= 5000mL y voltaje= 6 V, se alcanzó una **eficiencia de remoción de 73.12%**

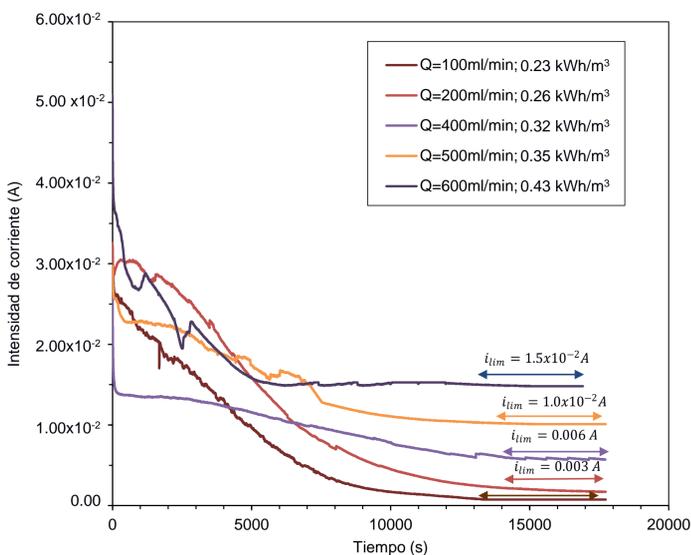


Figura 2. Influencia de variación del caudal en la intensidad de corriente. Volumen: 1000 mL; Voltaje: 6 V.

Variación de voltaje

El % de remoción de As es proporcional al aumento de voltaje. Al incrementar el voltaje de 4 a 6 V, tratando un volumen de 5000 mL, se observó un aumento del **20% en la eficiencia de remoción de As.**

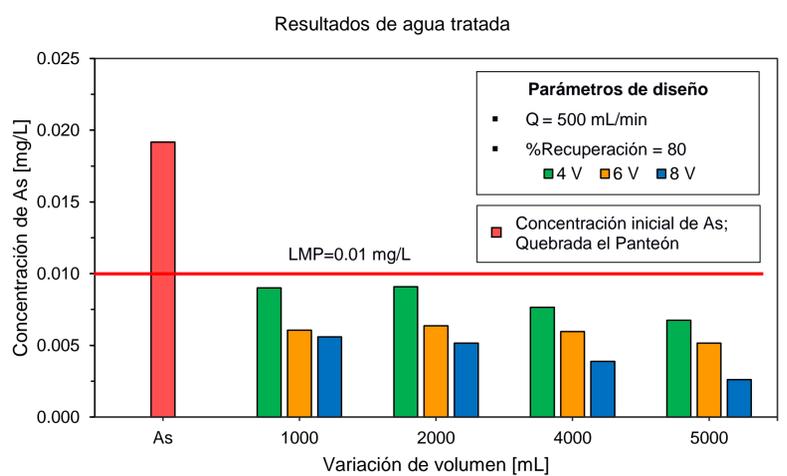


Figura 3. Influencia de variación de voltaje en la remoción de As. Volumen: 5000 mL; Voltaje: 6 V.

CONCLUSIONES

- Se determinaron las variables de diseño para el funcionamiento óptimo del sistema de ED, los cuales fueron voltaje de 6 V; caudal=500 mL/min; volumen=5000 mL con un 80% de porcentaje de recuperación teórico.
- Bajo los parámetros óptimos de diseño óptimos se alcanzó una **remoción** de As del 73%, una **energía específica** de 0.059 kWh/m³, y un **costo energético** de \$ 0.006 por m³ de agua tratada.