



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE MACHALA**

**FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS**

**MAESTRÍA EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES: MENCIÓN EN MANEJO  
Y PRESERVACIÓN DE LOS RECURSOS NATURALES**

**EVALUACIÓN COMPARATIVA DEL FUNCIONAMIENTO DE DOS LÍNEAS DE  
TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL BASADAS EN HUMEDALES  
CONSTRUIDOS EN LA CONCESIÓN MINERA SACACHISPAS EL ORO,  
ECUADOR.**

**ING. CARLOS ENRIQUE CAMPOS CAMPOS**

**EN LÍNEA**

**TUTOR**

**ING. ISMAEL LEONARDO VERA PUERTO. PHD**

**COTUTOR**

**ING. IRÁN RODRÍGUEZ DELGADO. MGS**

**MACHALA**

**2024**

## **PENSAMIENTO**

*Produce una inmensa tristeza pensar que la naturaleza habla mientras el género humano no la escucha (V́ctor Hugo).*

## **DEDICATORIA**

Este trabajo se lo dedico a Jesucristo nuestro señor todopoderoso que, gracias a él, nuevamente estoy en una de las altas instancias de mi vida profesional.

A mi abuelita Cristela Apolo que en paz descanse, que desde aquí de la tierra quisiera ver su sonrisa que, con su amor, lucha y valentía siempre será una inspiración para mí.

A mis amados padres, Abdón y Esmeralda que, gracias a su bondad, buen ejemplo, cariño y amor, decirles que lucho cada día por ellos.

A mi querida hermana Andrea y Celena, por creer y apoyarme incondicionalmente en este trayecto.

Con todo mi amor y gratitud,

*Carlos Enrique Campos C.*

## **AGRADECIMIENTOS**

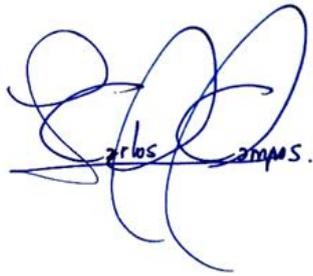
Agradezco infinitamente al Dr. Ismael Leonardo Vera Puerto docente investigador de la Universidad Católica del Maule – Chile, quien aceptó gustosamente dirigir esta tesis como tutor. Su profesionalismo, orientación y tiempo dedicado, fueron claves para que este trabajo alcance un nivel de calidad. No sólo es un excelente profesional, si no un ejemplo a seguir.

También agradezco de manera especial al Sr. Manuel Rojas Amari, donde por medio de una de sus empresas “Bursal S.A” dirigido por sus gerencias Ing. William Ávila Rosales e Ing. Bryan Rojas Cruz, se demuestra que es posible llevar una minería responsable y amigable con el medio ambiente. Como la utilización de pantanos secos artificiales – humedales construidos empleados para el tratamiento de agua residual.

Finalmente, agradecer a la Universidad Técnica de Machala por este programa de maestría presidido por su coordinadora Dra. Leonor Margarita Rivera Intriago, y a todo el grupo de docencia.

## **RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA**

Yo, Ing. Carlos Enrique Campos Campos con C.I. 070633080-0 declaro que el trabajo “Evaluación Comparativa del Funcionamiento de dos Líneas de Tratamiento de Agua Residual Basadas en Humedales Construidos en la Concesión Minera Sacachispas El Oro, Ecuador”, en opción al título de Magister en Recursos Naturales Renovables con Mención en Manejo y Preservación de los Recursos Naturales, es original y auténtico; definiciones de líneas de tratamiento, datos, resultados con de mi exclusiva responsabilidad.

A handwritten signature in blue ink, consisting of several loops and flourishes. The name "Carlos Campos" is written in a cursive style across the middle of the signature.

Ing. Carlos Enrique Campos Campos  
C. I. 070633080-0

Machala, 2024/septiembre/27

## REPORTE DE SIMILITUD TURNITIN

### EVALUACIÓN COMPARATIVA DEL FUNCIONAMIENTO DE DOS LÍNEAS DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL BASADAS EN HUMEDALES CONSTRUIDOS EN LA CONCESIÓN MINERA SACACHISPAS EL ORO, ECUADOR.

#### INFORME DE ORIGINALIDAD

4%

INDICE DE SIMILITUD

4%

FUENTES DE INTERNET

1%

PUBLICACIONES

2%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

#### FUENTES PRIMARIAS

1

[hdl.handle.net](https://hdl.handle.net)

Fuente de Internet

2%

2

[agua.org.mx](https://agua.org.mx)

Fuente de Internet

1%

3

[erp.untumbes.edu.pe](https://erp.untumbes.edu.pe)

Fuente de Internet

<1%

4

[caobangedu.vn](https://caobangedu.vn)

Fuente de Internet

<1%

5

Submitted to Universidad Técnica de Machala

Trabajo del estudiante

<1%

6

[1library.co](https://1library.co)

Fuente de Internet

<1%

7

Martha Prieto-Guevara, Jhiry Hernández B, Catalino Gómez R, Sandra Pardo C, Victor Atencio-Garcia, Priscila V Rosa. "Efecto de tres tipos de presas vivas en la larvicultura de

<1%

bagre blanco (Sorubim cuspicaudus)", Revista  
MVZ Córdoba, 2013

Publicación



anda.inec.gob.ec

Fuente de Internet

<1%

---

Excluir citas

Apagado

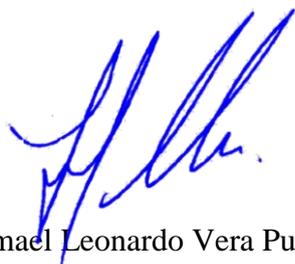
Excluir coincidencias < 40 words

Excluir bibliografía

Apagado

## **CERTIFICACIÓN DEL TUTOR**

Yo, Ing. Ismael Leonardo Vera Puerto. PhD. con C.I 22706600-8 tutor del trabajo de “Evaluación comparativa del funcionamiento de dos líneas de tratamiento de agua residual, basadas en Humedales Construidos en la concesión minera Sacachispas El Oro, Ecuador”, en opción al título de Magister en Recursos Naturales Renovables con Mención en Manejo y Preservación de los Recursos Naturales, ha sido revisado, enmarcado en los procedimientos científicos, técnicos, metodológicos y administrativos establecidos por el Centro de Posgrado de la Universidad Técnica de Machala (UTMACH), razón por la cual doy fe de los méritos suficientes para que sea presentado a evaluación.



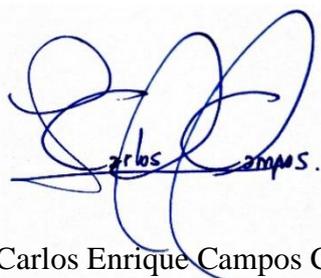
Ing. Ismael Leonardo Vera Puerto. PhD.  
C.I. 22706600-8

Machala, 2024/Septiembre, 27

## CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, Ing. Carlos Enrique Campos Campos con C.I. 070633080-0, autor del trabajo de titulación “Evaluación Comparativa del Funcionamiento de dos Líneas de Tratamiento de Agua Residual Basadas en Humedales Construidos en la Concesión Minera Sacachispas El Oro, Ecuador”, en opción al título de Magister en Recursos Naturales Renovables con Mención en Manejo y Preservación de los Recursos Naturales, declaro bajo juramento que:

- El trabajo aquí descrito es de mi autoría, no ha sido presentado previamente en ningún grado o calificación profesional. En consecuencia, asumo la responsabilidad frente a cualquier reclamo o demanda por parte de terceros de manera exclusiva.
- Cede a la Universidad Técnica de Machala de forma exclusiva con referencia a la obra en formato digital los derechos de:
  - a. Incorporar la mencionada obra en el repositorio institucional para su demostración a nivel mundial, respetando lo establecido por la Licencia Creative Commons Attribution No Comercial – Compartir Igual 4.0 Internacional (CC BY NCSA 4.0); la Ley de Propiedad Intelectual del Estado Ecuatoriano y el Reglamento Institucional.
  - b. Adecuarla a cualquier formato o tecnología de uso en INTERNET, así como correspondiéndome como Autor la responsabilidad de velar por dichas adaptaciones con la finalidad de que no se desnaturalice el contenido o sentido de la misma.



Ing. Carlos Enrique Campos Campos  
C.I. 070633080-0

Machala, 2024/Septiembre, 27

## ÍNDICE GENERAL

	Pág.
UNIVERSIDAD TÉCNICA DE MACHALA .....	1
PENSAMIENTO .....	2
DEDICATORIA .....	3
AGRADECIMIENTOS.....	4
RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA .....	5
REPORTE DE SIMILITUD TURNITIN.....	6
CERTIFICACIÓN DEL TUTOR.....	8
CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR .....	9
ÍNDICE GENERAL .....	10
ÍNDICE DE FIGURAS .....	14
ÍNDICE DE TABLAS .....	15
RESUMEN .....	17
ABSTRACT .....	18
CAPÍTULO I.....	19
1. INTRODUCCIÓN .....	19
1.1. HIPÓTESIS .....	21
A. HIPÓTESIS GENERAL.....	21
1.2. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	21
1.2.1. OBJETIVO GENERAL .....	21
1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	21
CAPÍTULO II.....	22
2. MARCO TEÓRICO .....	22
2.1.1. PROBLEMÁTICA DE LAS AGUAS RESIDUALES.....	22
2.1.2. TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES.....	22
2.1.3. EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES .....	23
2.1.4. HUMEDALES CONSTRUIDOS COMO SISTEMAS DE TRATAMIENTO .....	23

<b>2.1.5. CLASIFICACIÓN DE LOS HUMEDALES CONSTRUIDOS</b> .....	24
a) Humedal construido de Flujo libre subsuperficial (HC-HS) .....	25
b) Humedal Construido de flujo horizontal subsuperficial (HC-HSS) .....	25
c) Humedal construido de flujo subsuperficial vertical (HC-FV).....	26
d) Sistemas de humedales construidos híbridos .....	27
<b>2.1.6. MECANISMOS DE ELIMINACIÓN EN LOS HUMEDALES CONSTRUIDOS</b> .....	28
<b>2.1.7. DISEÑO Y CONFIGURACIÓN DE HUMEDALES CONSTRUIDOS</b> .....	29
<b>2.1.8. PARÁMETROS DE DISEÑO Y EFICIENCIA DE ELIMINACIÓN</b> .....	29
<b>2.1.9. HUMEDALES CONSTRUIDOS (HC) PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN CAMPAMENTOS MINEROS</b> .....	31
<b>2.2. MARCO CONCEPTUAL</b> .....	32
<b>CAPÍTULO III</b> .....	33
<b>3. MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	33
<b>3.1. MATERIALES</b> .....	33
<b>3.1.1. ÁREA DE ESTUDIO</b> .....	33
<b>3.1.2. MATERIALES DE OFICINA</b> .....	34
<b>3.2. CONFIGURACIÓN DEL DISEÑO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO BASADA EN HC DE SACACHISPAS</b> .....	34
3.2.1. Descripción de las líneas de tratamiento. ....	34
Humedal construido, vista corte transversal. ....	34
a) Línea 1 (P-L1-E):.....	35
b) Línea 2 (P-L2-E).....	35
3.2.2. Flujograma de descripción de las líneas de tratamiento .....	36
<b>3.3. METODOLOGÍA</b> .....	38
<b>3.3.1. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN</b> .....	38
<b>3.3.2. ENFOQUE DE INVESTIGACIÓN</b> .....	38
<b>3.3.3. UNIDAD DE ANÁLISIS</b> .....	38
<b>3.3.4. POBLACIÓN</b> .....	38
<b>3.3.5. MUESTRA</b> .....	39
<b>3.3.6. TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE DATOS</b> .....	40
<b>3.4. METODOLOGÍA PARA EL PRIMER OBJETIVO</b> .....	40
3.4.1. Variables a medir.....	41
3.4.2. Operacionalización de variables.....	41
<b>3.5. METODOLOGÍA PARA EL SEGUNDO OBJETIVO</b> .....	42
<b>3.6. METODOLOGÍA PARA EL TERCER OBJETIVO</b> .....	42
3.6.1. Rendimiento y cumplimiento operativo .....	42

3.6.2. Aplicación del afluyente – carga hidráulica .....	43
<b>3.7. PROCESAMIENTO ESTADÍSTICO .....</b>	<b>43</b>
<b>CAPÍTULO IV.....</b>	<b>45</b>
<b>4. RESULTADOS .....</b>	<b>45</b>
<b>4.1. ANÁLISIS DE CALIDAD DEL AGUA PARA DETERMINAR CAMBIOS EVOLUTIVOS EN EL SISTEMA COMPARANDO DOS PERIODOS DE FUNCIONAMIENTO Y SU REDUCCIÓN PORCENTUAL: .....</b>	<b>45</b>
<b>4.1.1. AFLUENTE (P-GL-A). .....</b>	<b>45</b>
a) Macro parámetros .....	45
b) Formas de nitrógeno .....	47
c) Metales.....	48
<b>4.1.2. EFLUENTE (P-L1-E).....</b>	<b>50</b>
a) Macro parámetros .....	50
b) Formas de nitrógeno .....	52
c) Metales.....	53
<b>4.1.3. EFLUENTE (P-L2-E).....</b>	<b>55</b>
a) Macro parámetros .....	55
b) Formas de nitrógeno .....	57
c) Metales.....	59
<b>4.2. EFICIENCIA COMPARATIVA DE AFLUENTE FRENTE A EFLUENTES Y ENTRE ELLOS.....</b>	<b>61</b>
a) Macroparámetros .....	61
b) Formas de nitrógeno .....	62
c) Metales.....	63
<b>4.3. VERIFICACIÓN DEL CUMPLIMIENTO NORMATIVO DE ENTRADA Y LÍNEAS DE TRATAMIENTO DURANTE EL PERIODO DE ESTUDIO.....</b>	<b>65</b>
a) Macro parámetros .....	65
b) Formas de nitrógeno .....	67
c) Metales.....	70
<b>CAPÍTULO V .....</b>	<b>73</b>
<b>5. DISCUSIONES .....</b>	<b>73</b>
<b>5.1. APLICACIÓN DEL AFLUENTE - CARGA HIDRÁULICA Y SU EFECTO EN EL TRATAMIENTO .....</b>	<b>73</b>
<b>5.2. EVOLUCIÓN DE LAS LÍNEAS A TRAVÉS DE LOS DOS PERIODOS EVALUADOS ..</b>	<b>74</b>
<b>5.3. COMPARATIVA ENTRE LAS DOS LÍNEAS DE TRATAMIENTO.....</b>	<b>74</b>
<b>5.4. CUMPLIMIENTO NORMATIVO POR PARÁMETRO EN LÍNEAS DE TRATAMIENTO</b>	

<b>CAPÍTULO VI.....</b>	<b>76</b>
<b>6. CONCLUSIONES.....</b>	<b>76</b>
<b>7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>77</b>
<b>8. ANEXOS.....</b>	<b>88</b>
<b>8.1 ANEXO 1.....</b>	<b>88</b>
PORCENTAJE DE REDUCCIÓN LÍNEA 1 (P-L1-E).....	88
<b>8.2 ANEXO 2.....</b>	<b>89</b>
PORCENTAJE DE REDUCCIÓN LÍNEA 1 (P-L2-E).....	89

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
<b>Figura 1.</b> Mecanismos de depuración en HC.....	24
<b>Figura 2.</b> Sistema de agua superficial libre .....	25
<b>Figura 3.</b> Sistema de humedal subsuperficial horizontal.....	26
<b>Figura 4.</b> Humedal Construido de Flujo subsuperficial Vertical HC- FV.....	27
<b>Figura 5.</b> Combinación de humedales-sistema híbrido .....	27
<b>Figura 6.</b> Ubicación del área de estudio .....	33
<b>Figura 7.</b> Humedal construido, vista corte transversal .....	34
<b>Figura 8.</b> Flujograma de descripción de líneas de tratamiento.....	37
<b>Figura 9.</b> Evolución temporal de la demanda química de oxígeno (DQO). P-GL-A (♦), efluente línea I P-L1-E (Δ), y efluente línea II P-L2-E (∇). .....	65
<b>Figura 10.</b> Evolución temporal del pH. P-GL-A (♦), efluente línea I P-L1-E (Δ), y efluente línea II P-L2-E (∇). .....	65
<b>Figura 11.</b> Evolución temporal de sólidos disueltos totales (SDT). P-GL-A (♦), efluente línea I P-L1-E (Δ), y efluente línea II P-L2-E (∇). .....	66
<b>Figura 12.</b> Evolución de nitratos (NO <sub>3</sub> ). P-GL-A (♦), efluente línea I P-L1-E (Δ), y efluente línea II P-L2-E (∇). .....	68
<b>Figura 13.</b> Evolución en el tiempo de nitritos (NO <sub>2</sub> ). P-GL-A (♦), efluente línea I P-L1-E (Δ), y efluente línea II P-L2-E (∇). .....	68
<b>Figura 14.</b> Evolución en el tiempo de Aluminio (Al). P-GL-A (♦), efluente línea I P-L1-E (Δ), y efluente línea II P-L2-E (∇). .....	70
<b>Figura 15.</b> Evolución en el tiempo de Arsénico (As). P-GL-A (♦), efluente línea I P-L1-E (Δ), y efluente línea II P-L2-E (∇). .....	70
<b>Figura 16.</b> Evolución de la concentración de Hierro (Fe). P-GL-A (♦), efluente línea I P-L1-E (Δ), y efluente línea II P-L2-E (∇). .....	71
<b>Figura 17.</b> Concentración a lo largo de los años de manganeso (Mn). P-GL-A (♦), efluente línea I P-L1-E (Δ), y efluente línea II P-L2-E (∇). .....	71

## ÍNDICE DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
<b>Tabla 1.</b> Tratamiento de aguas servidas.....	28
<b>Tabla 2.</b> Procesos involucrados en la eliminación de materia orgánica .....	28
<b>Tabla 3.</b> Procesos involucrados en la eliminación de nitrógeno.....	29
<b>Tabla 4.</b> Principales parámetros de diseño en países seleccionados.....	30
<b>Tabla 5.</b> Parámetros y criterios de calidad del agua residual a analizar. Se incluye la clasificación del tipo de parámetro.....	39
<b>Tabla 6.</b> Instrumentos de recolección de datos.....	40
<b>Tabla 7.</b> Operacionalización de variables de líneas de tratamiento.....	41
<b>Tabla 8.</b> Instrumentos de análisis de datos .....	44
<b>Tabla 9.</b> Características del afluente – macro parámetros(P-GL-A) .....	45
<b>Tabla 10.</b> Prueba de normalidad para el afluente – macro parámetros (P-GL-A).....	45
<b>Tabla 11.</b> Resultado de comparación evolutiva del afluente (P-GL-A). .....	46
<b>Tabla 12.</b> Características del afluente – Formas de nitrógeno (P-GL-A).....	47
<b>Tabla 13.</b> Prueba de normalidad para el afluente (P-GL-A).....	47
<b>Tabla 14.</b> Resultado de comparación evolutiva del afluente (P-GL-A). .....	47
<b>Tabla 15.</b> Características del afluente, metales (P-GL-A).....	48
<b>Tabla 16.</b> Prueba de normalidad para el afluente (P-GL-A).....	49
<b>Tabla 17.</b> Resultado de comparación evolutiva del afluente - metales (P-GL-A).....	49
<b>Tabla 18.</b> Características del efluente, macro parámetros (P-L1-E).....	51
<b>Tabla 19.</b> Prueba de normalidad para el efluente (P-L1-E).....	51
<b>Tabla 20.</b> Resultado de comparación evolutiva del afluente (P-L1-E).....	51
<b>Tabla 21.</b> Características del efluente (P-L1-E). .....	52
<b>Tabla 22.</b> Prueba de normalidad para el efluente (P-L1-E).....	53
<b>Tabla 23.</b> Resultado de comparación evolutiva del afluente (P-L1-E).....	53
<b>Tabla 24.</b> Características del efluente (P-L1-E) .....	54
<b>Tabla 25.</b> Prueba de normalidad para el efluente (P-L1-E).....	54
<b>Tabla 26.</b> Resultado de comparación evolutiva del afluente (P-L1-E).....	55
<b>Tabla 27.</b> Características del efluente – macro parámetros. ....	56
<b>Tabla 28.</b> Prueba de normalidad para el efluente macro parámetros (P-L2-E).....	56
<b>Tabla 29.</b> Resultado de comparación evolutiva del afluente macro parámetros (P-L2-E). .....	56

<b>Tabla 30.</b> Características del efluente, formas de nitrógeno.....	58
<b>Tabla 31.</b> Prueba de normalidad para el efluente (P-L2-E).....	58
<b>Tabla 32.</b> Resultado de comparación evolutiva del afluente (P-L2-E).....	58
<b>Tabla 33.</b> Características del efluente metales – metales (P-L2-E).....	59
<b>Tabla 34.</b> Prueba de normalidad para el efluente metales (P-L2-E).....	60
<b>Tabla 35.</b> Resultado de comparación evolutiva del afluente (P-L2-E).....	60
<b>Tabla 36.</b> Macro parámetros comparación, para los dos periodos de tiempo. ....	61
<b>Tabla 37.</b> Formas de nitrógeno, comparación para los dos periodos de estudio .....	62
<b>Tabla 38.</b> Comparación metales, para los dos periodos de estudio .....	63
<b>Tabla 39.</b> Porcentaje de cumplimiento macro parámetros .....	66
<b>Tabla 40.</b> Formas de nitrógeno.....	69
<b>Tabla 41.</b> Porcentaje de cumplimiento metales .....	72
<b>Tabla 42.</b> Cálculo de carga hidráulica por línea de tratamiento. ....	73

## RESUMEN

El estudio evalúa el rendimiento operativo de dos líneas de tratamiento (P-L1-E y P-L2-E) empleadas para manejar los residuos líquidos de la minera Sacachispas, por un periodo de (8 años). El rendimiento y comportamiento se estudió a través de variables de calidad del agua considerando macro parámetros (DQO, aceites y grasas, pH, STD), formas de nitrógeno ( $\text{NO}_3$ ,  $\text{NO}_2$ ) y, metales (Al, As, Cd, Cu, Fe, Mn, Pb). Para este análisis, se utilizó herramientas estadísticas, las que inicialmente sometieron a desarrollar una comparativa para el afluente (P-GL-A), los efluentes (P-L1-E y P-L2-E) y entre ellos. Además, se estudió su comportamiento evolutivo, dividiendo el análisis a dos períodos de operación: menor y/o mayor a 4 años. Por otro lado, para determinar la similitud o diferencia entre las dos líneas de tratamiento dependiendo de la normalidad de los datos empleando Shapiro Wilks se aplicó: a) para datos con distribución normal (Prueba t pareada) y b) para datos sin distribución normal (prueba de Wilcoxon). Finalmente, se realizó una evaluación de la eficiencia de eliminación y del cumplimiento de la normativa ambiental aplicada en Ecuador (Acuerdo Ministerial N° 097-A). Para el procesamiento y análisis de los datos, se utilizó el software estadístico InfoStat 2020 versión estudiantil, empleando una confiabilidad del 95% (Alfa=0.05).

Los resultados luego de evaluar el rendimiento de las líneas de tratamiento no evidenciaron cambios evolutivos en los efluentes, ni entre ellos ( $p > 0,05$ ), es decir las dos líneas de tratamiento funcionaron de manera similar en los ocho años analizados. Pese a esto, la línea P-L2 mostró cierta tendencia de mejora frente a la línea P-L1. También y en general, ambas líneas de tratamiento redujeron considerablemente la concentración afluente y presentando algún grado de eliminación y/o reducción de los parámetros de calidad del agua evaluados.

Estos resultados se convierten en un hito importante para el mundo de la investigación en HC, ya que, tratando efluentes mineros, los HC, como una solución basada en la naturaleza aplicada al campamento minero Sacachispas, han alcanzado un desempeño ambiental importante al reducir los contaminantes presentes en los efluentes en ambas líneas de tratamiento cumpliendo con la legislación ambiental vigente del Ecuador.

**Palabras clave:** aguas residuales en minería, humedales construidos, líneas de tratamiento, periodo de tiempo, *Thypha latifolia* (totora).

## ABSTRACT

The study evaluates the operational performance of two treatment lines (P-L1-E and P-L2-E) employed to manage the liquid waste of the Sacachispas mining company over a period of 8 years. The performance and behavior were studied through water quality variables, considering macro-parameters (COD, oils and greases, pH, TSS), nitrogen forms (NO<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>), and metals (Al, As, Cd, Cu, Fe, Mn, Pb). For this analysis, statistical tools were used, which initially involved developing a comparative analysis for the influent (P-GL-A), effluents (P-L1-E and P-L2-E), and between them. Additionally, their evolutionary behavior was studied by dividing the analysis into two operating periods: less than or equal to 4 years and greater than 4 years. On the other hand, to determine the similarity or difference between the two treatment lines depending on the normality of the data using Shapiro-Wilk, the following were applied: a) for data with normal distribution (paired t-test) and b) for data without normal distribution (Wilcoxon test). Finally, an evaluation of the removal efficiency and compliance with the environmental regulations applied in Ecuador (Ministerial Agreement No. 097-A) was performed. For data processing and analysis, the InfoStat 2020 software was used, employing a 95% confidence level (Alpha=0.05).

The results, after evaluating the performance of the treatment lines, did not show evolutionary changes in the effluents or between them ( $p > 0.05$ ), meaning that both treatment lines functioned similarly over the eight years analyzed. Despite this, the P-L2 line showed a certain trend of improvement compared to the P-L1 line. Also, in general, both treatment lines significantly reduced the influent concentration, presenting some degree of removal and/or reduction of the evaluated water quality parameters. These results become an important milestone for the world of research in constructed wetlands, as they have achieved significant environmental performance in reducing contaminants present in the effluents in both treatment lines, complying with the current environmental legislation in Ecuador.

**Keywords:** wastewater in mining, constructed wetlands, treatment lines, time period, *Thypha latifolia* (cattail).

## CAPÍTULO I

### 1. INTRODUCCIÓN

En primer plano, la contaminación química de los recursos hídricos es reconocida como un problema cada vez mayor en el mundo (Ventura et al. 2021). Según El Ágora diario del agua (2021), en América Latina, menos del 20 % de aguas residuales reciben tratamiento. En este sentido, Terán et al. (2023) informó que para Ecuador en el 2022, de 221 municipios el 73,3 % de gobiernos autónomos descentralizados municipales (GADM) realizaron tratamiento previo a su descarga; mientras que el 24 % de municipios no realizan tratamiento alguno. Frente a esto, la Secretaría del agua (2016) enunció que la contaminación hídrica proviene principalmente de la descarga de aguas residuales de las actividades minera artesanal, hidrocarburíferas y agrícola.

En consecuencia, Vishwakarma y Dharmendra (2022) señalan que para cumplir con los límites máximos permitidos de descarga, es obligatorio un tratamiento adecuado de las aguas residuales antes de descargarlas. En efecto, Pérez et al. (2022) indican que la necesidad de afrontar la gestión del tratamiento desde una perspectiva diferente a la convencional, ha obligado aplicar alternativas de tratamiento sostenibles (Arias & Brix, 2003; Ismail et al. 2020; Rahman et al. 2020; Etteieb et al. 2021), ecológicas (Upadhyay et al. 2016), con alta capacidad de remoción, y procesos amigables con el medio ambiente (Arias & Brix, 2003; Arias & Sulbarán, 2017; Wang et al. 2018; Etteieb et al. 2021), rentables, confiables (Ochoa-Rivero et al. 2019; Upadhyay et al. 2017), y económicamente viables (Arias & Brix, 2003; Padilla-Santillan et al. 2021) como es el caso, de los humedales construidos (HC) (Ochoa-Rivero et al. 2019; Upadhyay et al. 2017).

En particular, según Chen et al. (2021); Hassan et al. (2021) los HC son sistemas pasivos de ingeniería biológica, que brindan soluciones basadas en la naturaleza (Pérez et al. 2022; Vera-Puerto, 2021), diseñados y construidos para mejorar la calidad del agua (Wu et al. 2015b) en varios modos hidrológicos y configuraciones (Wu et al. 2015). Debido a su bajo costo, fácil operación, mantenimiento (Ruiz-López et al. 2010; Wu et al. 2015; Arias & Sulbarán, 2017; Ochoa-Rivero et al. 2019; Hamad, 2020; Zhong et al. 2020; Etteieb et al. 2021; Hassan et al. 2021; Khan et al. 2022), no requieren personal calificado (Arias & Brix, 2003). Además, proporcionan hábitat para la vida silvestre (Llagas & Gómez, 2006; Arias y Sulbarán, 2017; Hassan

et al. 2021; Pérez, et al. 2022). En la actualidad, su aplicación se extiende para purificar efluentes agrícolas, industriales, efluentes mineros, lixiviados de vertederos, aguas contaminadas de ríos y lagos (Hassan et al. 2021; Pérez, et al. 2022).

Por consiguiente, el tratamiento del agua en los HC involucra mecanismos de combinación física, química, e interacciones biológicas entre plantas (Arias & Brix, 2003; Vymazal, 2010; Arias & Sulbarán, 2017; Pat-Espadas et al. 2018; Rahman et al. 2020; Upadhyay et al. 2017; Pérez et al. 2022), el sustrato y la comunidad microbiana (Arias & Sulbarán. 2017; Upadhyay et al. 2017; Larriva & González, 2016; Omondi & Navalía, 2020; Hassan et al. 2021; Friedrichsen et al. 2021), y la intervención solar como fuente de energía (Arias & Brix, 2003). De hecho, en estos sistemas se da la ocurrencia de procesos de sedimentación, filtración, absorción (Llagas & Gómez, 2006; Pat-Espadas et al. 2018; Pérez et al. 2022), oxidación (Larriva & González, 2016; Pat-Espadas et al. 2018), volatilización (Pérez et al. 2022), reducción, complejación, quelación, mecanismos microbianos de conversión / inmovilización (Pat-Espadas et al. 2018), fotosíntesis, degradación biológica (Larriva & González, 2016), absorción activa de metales por parte de la planta y toma de nutrientes (Larriva & González, 2016; Pat-Espadas et al. 2018) funcionando con eficacia para entregar efluentes tratados de alta calidad (Friedrichsen et al. 2021).

En apariencia, para Chen et al. (2021); Etteieb et al. (2021) las operaciones mineras dan lugar a un aumento de las descargas de diversos tipos de contaminantes, incluido una gran cantidad metales pesados, que según Etteieb et al. (2021) pueden amenazar la calidad de agua de los cuerpos receptores. Además, (Ruiz-López et al. 2010) explican que tan pronto el agua contaminada alcanza los cuerpos de agua aledaños pueden ocurrir alteraciones a los ecosistemas presentes, afectando su aprovechamiento para el consumo humano o los propósitos agrícolas e industriales.

Ante esto, Hassan et al. (2021) precisan que la eliminación de metales pesados empleando HC muestra resultados prometedores y una alta eficiencia, sostenibles y de largo plazo para el tratamiento de efluentes mineros (Etteieb et al. 2021). Es más, según Sams (2014) la operatividad de HC para el tratamiento de agua de minas es muy variable y depende de las dimensiones y el tipo de humedal, la calidad del efluente y las tasas de carga. Más aún, autores como Postila et al. (2019); Liu et al. (2020) asumen que las concentraciones pueden variar dependiendo del tipo de mina, y de donde se origine en el interior de ella.

En definitiva, estos acontecimientos, involucra a que estas tecnologías basadas en la naturaleza (HC) a través del presente estudio permita conocer cómo se da el comportamiento con el paso del tiempo de ciertos parámetros físico-químicos en dos líneas de tratamiento, y sean así la base para que se implanten con seguridad en otros sectores estratégicos de Ecuador como asegurar la calidad de agua tratada, el cumplimiento de las normas ambientales y la descarga luego de su tratamiento.

## **1.1. Hipótesis**

### **a. Hipótesis General**

Al comparar el funcionamiento en la configuración existente de dos líneas de tratamiento de HC a lo largo del tiempo, existe o no una incidencia en su operación por parte de las variables de calidad del agua.

## **1.2. Objetivos de la investigación**

### **1.2.1. Objetivo general**

Evaluar el rendimiento operativo de dos líneas de tratamiento de agua residual, basadas en humedales construidos, para caracterizar su funcionamiento durante su operación en la concesión minera Sacachispas, El Oro, Ecuador, empleando variables de calidad del agua.

### **1.2.2. Objetivos específicos**

1. Establecer si se presenta un cambio evolutivo en la operación del sistema, para el manejo de la calidad de agua residual, comparando dos periodos de funcionamiento en la concesión minera Sacachispas, El Oro, Ecuador.
2. Comparar la eficiencia de las dos líneas de tratamiento de agua residual para la concesión minera Sacachispas, El Oro, Ecuador.
3. Verificar y comparar si las dos líneas de tratamiento cumplen con las regulaciones nacionales en cuanto a la calidad del agua residual tratada.

## CAPÍTULO II

### 2. MARCO TEÓRICO

#### 2.1.1. Problemática de las aguas residuales

En particular, conforme a Vishwakarma y Dharmendra (2022) en su estudio manifiestan que, debido a la eliminación de desechos no tratados en recursos hídricos naturales, se genera un rápido aumento de la contaminación. Por esta razón, Almendariz (2023) consideran que la contaminación del agua es considerada uno de los problemas ambientales, incluyendo a las aguas residuales como una amenaza a ecosistemas acuáticos y terrestres (Duran & Lino, 2023).

Según, Terán et al. (2023) en Ecuador en el 2022, el 44,3 % de las plantas de tratamiento de agua residual, disponen el agua tratada en los ríos, el 28,7 % en quebradas y el restante en otros sitios tales como, acequias de riego, canal, mar, entre otros. Esta problemática para Zambrano et al. (2022) es agravada por la baja disponibilidad de los recursos económicos, como la ausencia de infraestructuras físicas suficientes para tratarlas (Humanante et al. 2022; Montero-Vega et al. 2020).

#### 2.1.2. Tratamiento de las aguas residuales

En síntesis, Vargas et al. (2020); Humanante et al. (2022) indican que un sistema de tratamiento de aguas residuales consiste en una serie de procesos físicos, químicos y biológicos los cuales, conforme a Vishwakarma y Dharmendra (2022) juegan un papel importante para reducir el nivel de contaminación de las fuentes de agua. Además, para Almuktar et al. (2018) estos procesos dependen principalmente de la naturaleza, el diseño, el tipo de planta, la actividad microbiana, y las condiciones climáticas locales.

En este contexto, según lo descrito por Silva (2023) “el tratamiento de aguas residuales permiten la gestión sostenible de los recursos naturales, se diseñan para cumplir con “especificaciones adecuadas para el propósito. También es un motor para lograr los objetivos del desarrollo sostenible (ODS). El objetivo 6 está enfocado a garantizar el acceso al agua potable y el saneamiento para todos. Algunas de las técnicas comunes incluyen tratamiento primario, secundario y terciario. La selección del enfoque de tratamiento más adecuado se basa en criterios técnicos, económicos, sociales y criterios ambientales” pág. 3-4. Tal como lo señala Silva (2023) se aborda los siguientes aspectos:

- El tratamiento preliminar, involucra la eliminación mecánica de sólidos tanto gruesos como finos (Silva, 2023).
- El tratamiento primario permite que las partículas finas se asienten, elimina alrededor del 60 a 70 % de materiales sólidos en suspensión (Silva, 2023).
- El tratamiento secundario está diseñado para eliminar entre 70 y el 90 % de la materia orgánica, normalmente implica el uso de microorganismos para descomponer compuestos (Silva, 2023).
- El tratamiento terciario diseñado para eliminar compuestos que no se pueden eliminar durante el tratamiento primario y secundario. El objetivo es garantizar que el producto final no contenga ningún producto tóxico que pueda ser perjudicial para los seres humanos o plantas (Silva, 2023).

### **2.1.3. Evaluación de un sistema de tratamiento de aguas residuales**

Según los autores, (Sundara et al. 2010) “el desempeño de una planta de tratamiento de aguas residuales está ligado al grado de reducción de las variables de calidad del agua que se evalúen. Además, su desempeño depende no solo del diseño y construcción, sino también de una buena operación y mantenimiento. Por otro lado, la práctica de evaluación de unidades de plantas de tratamiento existentes también puede usarse para mejorar los procedimientos de diseño, y una herramienta importante y necesaria para su control adecuado es el muestreo y el análisis de laboratorio”.

### **2.1.4. Humedales construidos como sistemas de tratamiento**

De manera general, Arias y Brix (2003) argumentaron que incremento de la generación de aguas residuales ha obligado a utilizar alternativas de tratamiento de depuración eficientes, autónomas y económicamente viables. Como tratando de imitar los procesos naturales de la naturaleza (Larriva & González, 2016; Arias & Sulbarán, 2017; Ochoa-Rivero et al. 2019; Rahman et al. 2020; Hassan et al. 2021; Knox et al. 2021).

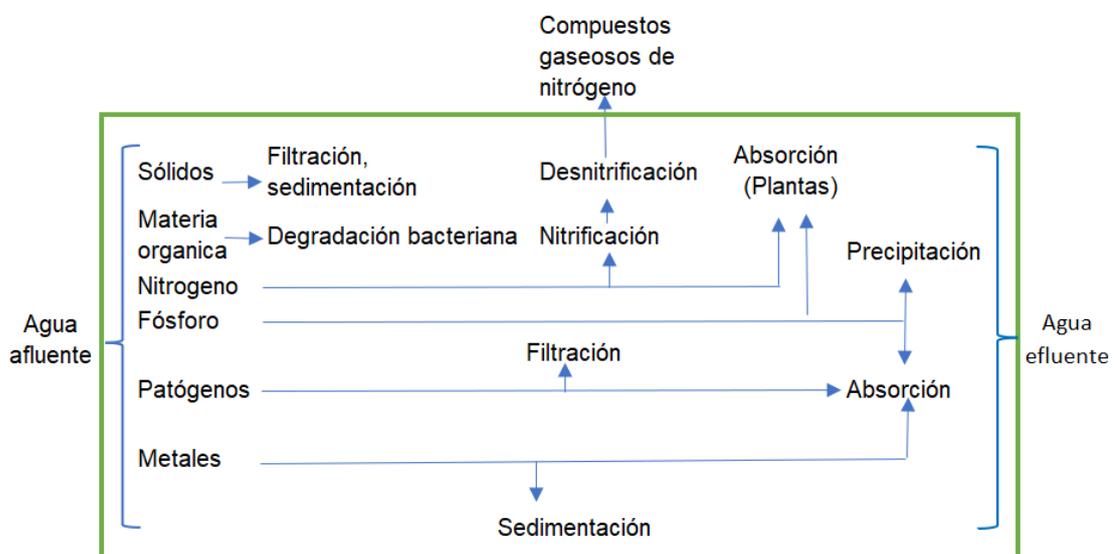
Así, los HC son soluciones eficientes basadas en la naturaleza (Canet-Martí et al. 2022; Nan et al. 2023), siendo sistemas poco profundos (Omondi & Navalía, 2020), que se utilizan para tratar diferentes tipos de aguas residuales (Upadhyay et al. 2016; Cong Manh et al. 2019; Friedrichsen et al. 2021; Canet-Martí et al. 2022) para reducir eficazmente las concentraciones de contaminantes (Kill et al. 2022).

Los HC se definen, como sistemas de ingeniería diseñados y construidos para mejorar la calidad del agua (Vymazal. 2010; Wu et al. 2015; Sanjrani et al. 2020; Tang et al. 2021; Vera-Puerto et al. 2021; Retta et al. 2023), bajo diferentes condiciones operativas aprovechando procesos naturales (Vera-Puerto et al. 2021; Pérez et al. 2022) que involucran vegetación, material de soporte, conjuntos microbianos (Vymazal, 2010; Vera et al. 2016; Retta et al. 2023; Vymazal. 2010; Sanjrani et al. 2020; Tang et al. 2021), para procesar contaminantes y mejorar su calidad (Vera-Puerto et al. 2022).

La Figura 1 resume de forma esquemática los diferentes procesos que se dan en los HC.

**Figura 1.**

*Mecanismos de depuración en HC*



**Fuente:** Odinga et al., (2013)

### 2.1.5. Clasificación de los humedales construidos

Fundamentalmente, los humedales construidos se pueden clasificar de acuerdo con diferentes criterios, dependiendo la hidrología (de flujo libre superficial o de flujo subsuperficial), forma de crecimiento de las plantas macrófitas (emergentes, sumergidas o de flotación libre); y la dirección del flujo (horizontal o vertical) (Vymazal, 2010; Arias & Sulbarán, 2017; Ochoa-Rivero et al. 2019; Hassan et al. 2021; Pérez et al. 2022). Sumado a esto, cada tipo de humedal tiene una fuente distinta del agente oxidante como el oxígeno (Wang et al. 2018).

### a) Humedal construido de Flujo libre subsuperficial (HC-HS)

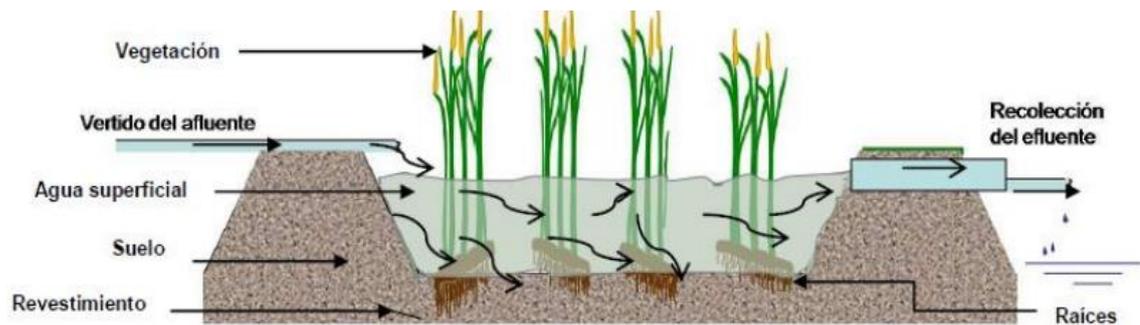
En estos HC la superficie del flujo de aguas residuales fluye por encima del sustrato en estanques o canales.

El tratamiento ocurre cuando el flujo de agua atraviesa lentamente el tallo y la raíz de la vegetación emergente, como lo señalan Llagas y Gómez (2006).

La Figura 2 presenta un esquema en corte de este tipo de humedal.

**Figura 2.**

*Sistema de agua superficial libre*



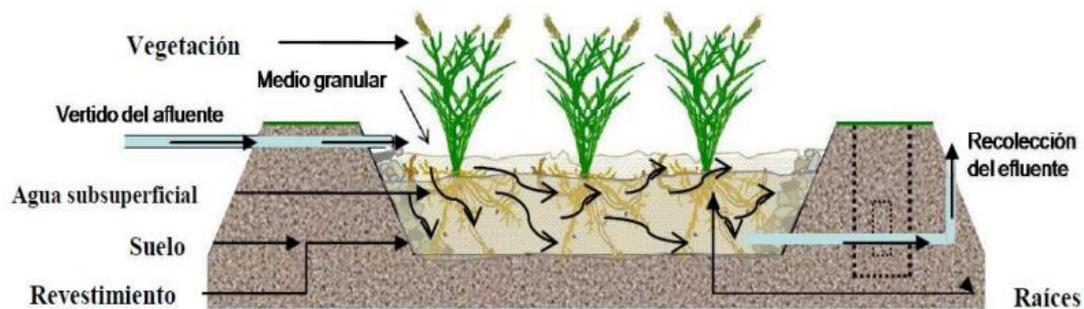
Fuente: Rabat (2016).

### b) Humedal Construido de flujo horizontal subsuperficial (HC-HSS)

En este tipo de HC, las aguas residuales fluyen horizontalmente en el lecho, desde la entrada hasta la zona de recolección, pasando por condiciones aeróbicas (zona de la raíz) y anaeróbicas (medio de soporte) (Wicke et al. 2019; Parde et al. 2021). Además, según Parde et al. (2021), “el requisito de superficie terrestre es de 5 a 10 m<sup>2</sup>/pe (población equivalente). Estos sistemas, son eficientes para la eliminación de contaminantes como DBO, DQO, TSS, entre otros. Asimismo, se pueden utilizar para tratar diferentes tipos de aguas residuales, es decir, residuos industriales, residuos agrícolas, residuos de minas. A su vez, requieren más superficie de medio filtrante que los humedales de flujo vertical”. La Figura 3 presenta un esquema de este tipo de tratamiento.

**Figura 3.**

*Sistema de humedal subsuperficial horizontal*



Fuente: Rabat (2016).

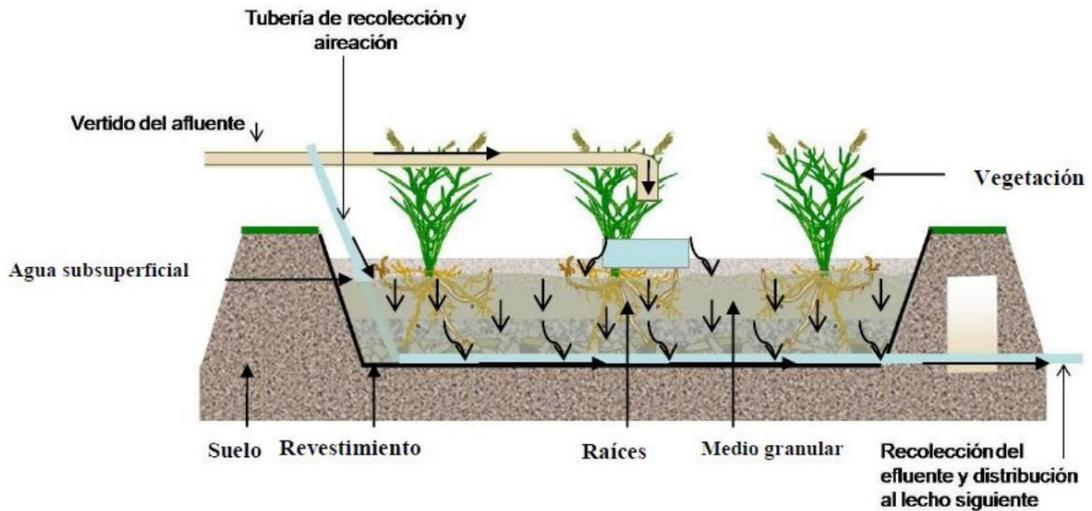
### c) Humedal construido de flujo subsuperficial vertical (HC-FV)

Según Parde et al. (2021) y Retta et al. (2023), los HC-FV, componentes del estudio, son sistemas donde las aguas residuales se sumergen desde la parte superior del humedal y drenan hasta la parte inferior, es decir, fluyen verticalmente a través del lecho. Además, ofrecen condiciones aeróbicas, mucho más que los HC-FH Vymazal (2010); Parde et al. (2021) por ende, logran una alta tasa de nitrificación (Arias & Brix, 2003; Vymazal, 2010; Parde et al. 2021). De acuerdo a Parde et al. (2021) el requisito de superficie terrestre oscila de 1 a 3 m<sup>2</sup>/ Persona – Equivalente (PE) que es menor que para los HC de FH, sin embargo, requieren más mantenimiento.

Ante lo demás, Wicke et al. (2019) y Asprilla (2020) explican que la recolección del agua filtrada a través de la zona de raíces de la planta, se da mediante tuberías perforadas o ranuradas ubicadas en el fondo del sistema De la Varga et al. (2017) y Asprilla (2020). Es más, Asprilla et al. (2020) señalan que la profundidad del medio granular está en un intervalo de 0.5 a 0.8 m y operan con cargas aproximadas de 20 g DQO/m<sup>2</sup>/d. La Figura 4 muestra una vista en corte de un HC de FV.

**Figura 4.**

*Humedal Construido de Flujo subsuperficial Vertical HC- FV.*



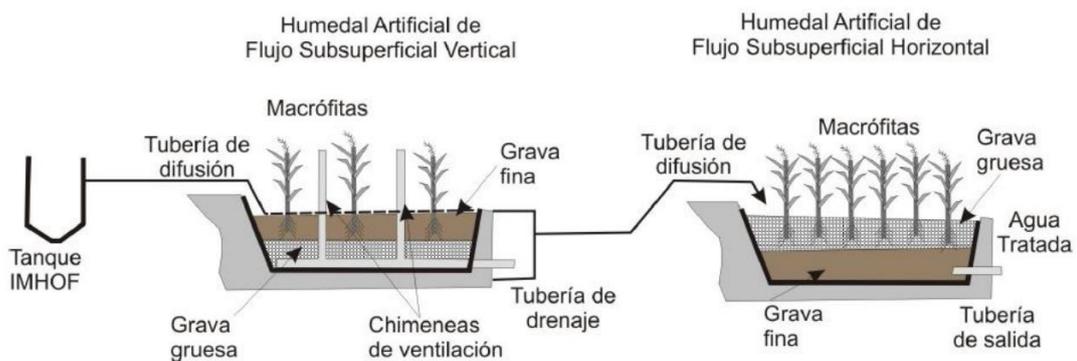
**Fuente:** Adaptado de García-Serrano & Corzo-Hernández (2008).

#### **d) Sistemas de humedales construidos híbridos**

En apariencia para Arias y Brix (2003) son combinaciones de HC que pueden estar compuestos por diferentes lechos, o según Rabat (2016) “en compartimentos para propiciar diferentes tipos de reacciones y procesos, con el fin de conseguir una mayor eficiencia en la reducción de contaminantes. Por ejemplo, el caso más utilizado de combinación de humedales se trata de humedales verticales, seguidos en serie por humedales horizontales” pág. 17 (Figura 5). Ante esto, (Parde et al. 2021) señalan que su eficiencia de eliminación es mayor en comparación con otros tipos de humedales.

**Figura 5.**

*Combinación de humedales-sistema híbrido.*



**Fuente:** Adaptado de Rabat, (2016 pág. 18).

### 2.1.6. Mecanismos de eliminación en los humedales construidos

La Tabla 1 es orientativa, respecto a las eficiencias de eliminación acorde a parámetros, y procesos involucrados para seleccionar el tipo de humedal cuando se aplican al tratamiento de aguas residuales domésticas. Por su parte, la Tabla 2 y Tabla 3 presentan un resumen de los principales procesos involucrados en el procesamiento de la materia orgánica y el nitrógeno, respectivamente.

**Tabla 1.**

*Tratamiento de aguas servidas*

Parámetro	HC - HS	HC- HSS	HC- HV
SST (%)	50 - 90	70 -95	70 - 95
DBO5 (%)	50 - 90	70 -95	50 -95
DQO (%)	40 -80	50 -60	50 - 90
NT (%)	20 - 60	20 - 60	35 - 55
PT (%)	10 - 50	10 - 50	10 - 50
CF (Unid. Long)	1 - 3	1 - 3	1 - 3

\*(N): SST: Sólidos suspendidos totales. DBO5: Demanda biológica de oxígeno a los 5 días. DQO: Demanda Química de Oxígeno. NT: Nitrógeno Total. PT: Fosforo. CF: Coliformes fecales. a) HC-FS: Humedal Construido de flujo horizontal superficial. b) HC-FH: Humedal Construido de flujo horizontal subsuperficial y c) HC-FV: Humedal de flujo vertical subsuperficial.

Fuente: Vymazal (2010).

**Tabla 2.**

*Procesos involucrados en la eliminación de materia orgánica*

Tipo de HC	HS	HSS	HV
Sedimentación	****	****	****
Absorción de la planta	*	*	*
Absorción microbiana	*	*	*
Respiración aeróbica	***	*	*****
Respiración anaeróbica	***	*****	**

\*(N): a) HC-FS: Humedal Construido de flujo horizontal superficial. b) HC-FH: Humedal Construido de flujo horizontal subsuperficial y c) HC-FV: Humedal de flujo vertical subsuperficial.

Fuente: Vera (2021).

**Tabla 3.***Procesos involucrados en la eliminación de nitrógeno.*

<b>Tipo de HC</b>	<b>HS</b>	<b>HSS</b>	<b>HV</b>
Amonificación	****	****	****
Volatilización de NH <sub>3</sub>	***		
Nitrificación	***	*****	*****
Desnitrificación	***	*****	*
Absorción de la planta	**	**	**
Fijación de nitrógeno	***		
Absorción microbiana	**	**	**
Amonificación NO <sub>3</sub>			
Anammox			
Sorción/desorción	*	**	**
Entierro	**	*	*

**Fuente:** Vera (2021).**2.1.7. Diseño y configuración de humedales construidos**

En términos generales, Kadlec y Wallace (2008) explican que el objetivo del diseño de los HC es mantener el agua debajo de la superficie del lecho. En este sentido, EPA (2015); Omondi & Navalía (2020) consideran que la hidrología se considera un factor importante para el éxito o fracaso de los HC. Además, influyen otras variables como la elección de plantas, su localización geográfica, sustratos, profundidad del agua, tasa de carga hidráulica (HLR), tiempo de retención hidráulica (HRT), modo de alimentación, dimensión (relación largo - ancho), microorganismos, pendiente, estacionalidad (invierno - verano) (Arias & Brix, 2003; Ochoa-Rivero et al. 2019; Rahman et al. 2020; Hassan et al. 2021), y la carga orgánica, según Upadhyay et al. (2016) las cuales, pueden ser cruciales para lograr un rendimiento de tratamiento de HC exitoso, como lo destacan Rahman et al. (2020).

**2.1.8. Parámetros de diseño y eficiencia de eliminación**

En síntesis, Rahman et al. (2020) han considerado, para la evaluación como el papel del diseño y/o los factores operativos de los HC el comportamiento de los parámetros físico-químicos de la calidad del agua. Por otro lado, respecto a la eficiencia de eliminación de cualquier HC está en función de la tasa de descomposición del contaminante (Waly et al. 2022). Ante esto, Humanante et al. (2022), indicaron que “la relación entre la concentración removida y la masa con concentración del afluente,

normalmente expresado en porcentaje. La determinación de esta es la base esencial para corroborar el correcto funcionamiento de un sistema de depuración”.

Dentro de esta perspectiva, Rahman et al. (2020) destacan que la revisión del diseño y los parámetros operativos evidencian que la eficiencia óptima del tratamiento depende de las condiciones ambientales, hidráulicas y operativas. Por ejemplo, como la calidad de la descarga, características del afluente (Vera-Puerto et al. 2021), la vegetación, las comunidades microbianas (Dong et al. 2011), la velocidad y otras configuraciones (Waly et al. 2022) las cuales pueden variar considerablemente (Dong et al. 2011).

En este contexto, es importante citar parámetros de guía de diseño en algunos países, los que se presentan en la Tabla 4.

**Tabla 4.**

*Principales parámetros de diseño en países seleccionados.*

<b>Sistema de humedales Construidos</b>	<b>República Checa</b>	<b>España</b>	<b>Estados Unidos de América</b>	<b>Reino Unido</b>
Etapa de tratamiento	Secundario	Secundario	Secundario	Terciario
Pretratamiento	Rejillas + tanque imhoff	Rejillas + tanque séptico	Tanque séptico	Sedimentación primaria + Tratamiento biológico
Requerimiento específico de área superficial (m <sup>2</sup> /hab - eq)		10	5 - 10	0.7
Máxima tasa de carga orgánica superficial (gDBO <sub>5</sub> / m <sup>2</sup> .d)	*	6	4 - 8	2 - 13
Máxima tasa de carga orgánica transversal (DBO <sub>5</sub> / m <sup>2</sup> . d)	*	*	250 <sup>a</sup>	*
Tasa de carga hidráulica (mm/d)	*	20	20 - 40	200
Tamaño de grava (mm/d)	< 20	5 - 6	> 4	10 - 12
Sistema de distribución	Tubería subsuperficial	Tubería subsuperficial	Tubería subsuperficial	Canal superficial

**Fuente:** Dotro et al. (2021)

### **2.1.9. Humedales construidos (HC) para el tratamiento de aguas residuales en campamentos mineros**

A modo general, Lavigne (2014) explica que la extracción de oro en minas poco profundas en regiones húmedas típicamente requiere el bombeo continuo de agua. Esta agua ingresa a la mina a través de fisuras en la roca, pudiendo contener altas concentraciones de sólidos suspendidos y sedimentables producidos durante el proceso de perforación pudiendo presentar niveles inaceptables de metales pesados.

Autores como Pat-Espadas et al. (2018) indican que, los sistemas de HC son actualmente la tecnología de tratamiento pasivo de agua de mina más ampliamente utilizada, y pueden modificarse y alimentarse con materia orgánica. Aunque para, Liu et al. (2020) la eliminación total de algunos metales pesados no es posible, sus propiedades físicas y químicas se alteran, lo que contribuye a una reducción de su toxicidad en el medio natural. Frente a esto, Ashraf et al. (2011); Liu et al. (2020) resaltan que los metales pesados procedentes de la minería en HC pueden minimizar su carga contaminante mediante la retención física-sedimentación, absorción y precipitación de relleno, absorción de plantas y sedimentos, y biosorción microbiana.

Básicamente, Hassan et al. (2021) afirman que el rendimiento de la eliminación empleando HC depende de la calidad del agua de entrada y de los mecanismos de eliminación de metales. Esta tecnología combina procesos biogeoquímicos, geoquímicos y físicos que ocurren naturalmente (Pat-Espadas et al. 2018; Omondi & Navalía, 2020; Ishaq et al. 2021) que especialmente, se puede utilizar para la remediación a largo plazo del agua de mina (Pat-Espadas et al. 2018).

En definitiva, Pat-Espadas et al., (2018) señalan que las eficiencias de eliminación de metales pesados de HC son variables y dependen de diversos factores como la composición del material de soporte y el tiempo de operación. Como también, la variación entre los metales y entre humedales (Sams, 2014).

## 2.2. MARCO CONCEPTUAL

- **Cambio evolutivo:** En cuanto a la calidad de agua es la estimación referida a una posible diferencia entre una línea de tiempo (8 años), establecidas por periodos de funcionamiento.
- **Carga hidráulica (HLR):** se define como la tasa a la que se descargan las aguas residuales al sistema de tratamiento de HC, expresada en profundidad o volumen de agua por unidad de tiempo (Waly et al. 2022).
- **Desnitrificación:** se refiere a la transformación de nitratos o nitritos a óxidos de nitrógeno, amoníaco, y nitrógeno total.
- **Efluente minero:** mezcla de agua con diferentes clases de minerales y metales, provenientes de procesos de perforación y voladura, molienda y planta de beneficio.
- **Líneas de funcionamiento:** Referido a los humedales construidos es la compartimentalización por uno, dos, o más sistemas, instalados de forma secuencial o paralela para mejora del efluente final.
- **HC:** Humedal Construido.
- **HC – FS:** humedal Construido de flujo horizontal superficial.
- **HC – FH:** humedal Construido de flujo horizontal subsuperficial.
- **HC- FV:** humedal Construido de flujo vertical subsuperficial.
- **LMP:** límites máximos permisibles.
- **Nitrificación:** transformación de amonio a nitratos a través de bacterias nitrificantes que viven en los sistemas de HC.
- **Nitrato ( $\text{NO}_3^-$ )** es la forma más oxidada de nitrógeno, es químicamente estable y puede servir como nutriente esencial para el crecimiento de las plantas, un exceso lleva a la eutrofización de la superficie del agua (Azcoitia, 2012).
- **Nitrito ( $\text{NO}_2^-$ )** se encuentra en un estado de oxidación intermedio entre el amonio y nitrato (Azcoitia, 2012)

## CAPÍTULO III

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

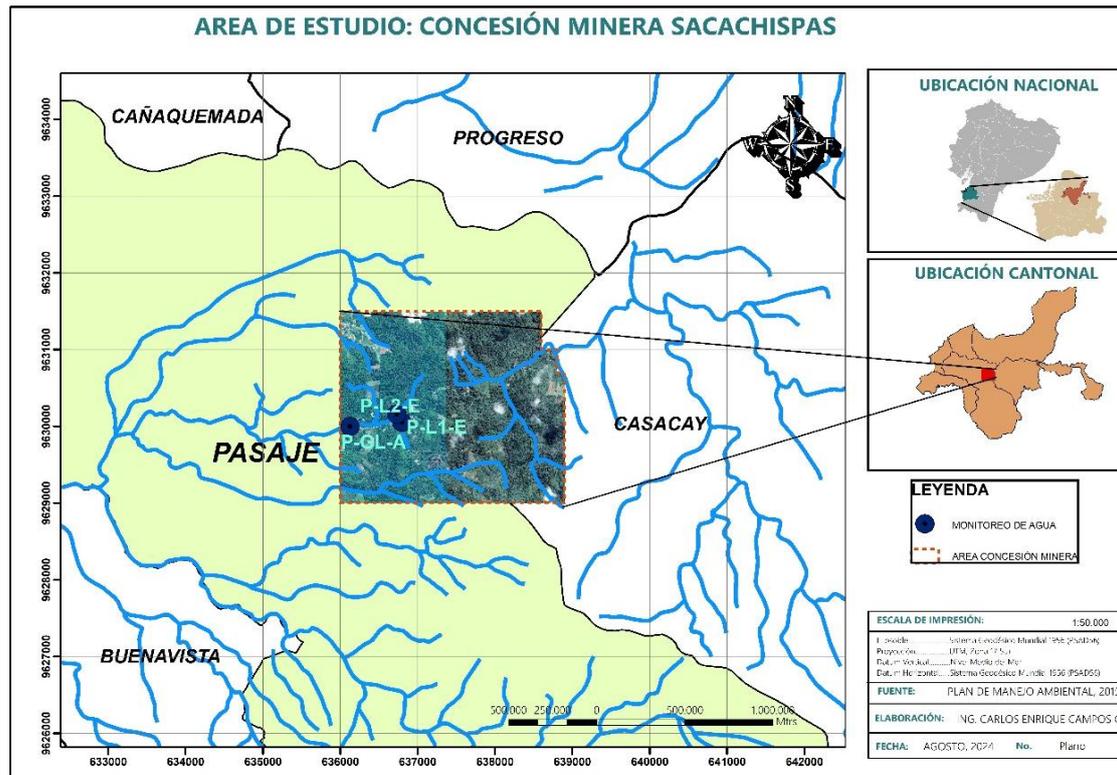
#### 3.1. Materiales

##### 3.1.1 Área de estudio.

Este trabajo se desarrolló en el sistema de tratamiento de aguas residuales de la Concesión Minera Sacachispas compuesta de 707 ha, situada en la región costa sur del Ecuador, provincia de El Oro, cantón Pasaje, parroquia Loma de Franco, a una altitud entre los 90 y 150 msnm (Figura 6). Según, Jambatoconsult (2021) “Pertenece al piso zoogeográfico tropical suroccidental - ecosistema Bosque siempreverde estacional inundable de llanura aluvial del Jama-Zapotillo. La temperatura media varía entre 21,6 y 24,4 °C, con una precipitación de 45 mm en época seca y de 357 mm en época lluviosa, y una humedad relativa de 84,34%. Presenta tres tipos de vegetación, rastrojo, cultivos y vegetación riparia, el uso anterior y actual del suelo la conforma plantaciones cacaoteras”.

**Figura 6.**

*Ubicación del área de estudio*



**Fuente:** Elaboración propia

### 3.1.2 Materiales de oficina

Laptop

Programa InfoStat 2020 versión estudiantil

Impresora

Resma hojas papel bond

Lapicero

AutoCAD 2018

Registros de monitoreo

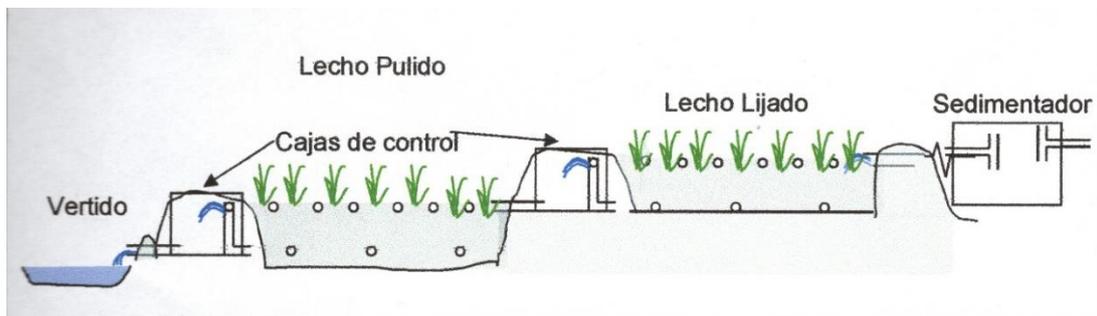
### 3.2. Configuración del diseño de la planta de tratamiento basada en HC de Sacachispas

A continuación, se describen los procesos empleados para análisis de este trabajo:

#### 3.2.1. Descripción de las líneas de tratamiento.

**Figura 7.**

*Humedal construido, vista corte transversal.*



**Fuente** Lavigne (2014).

Como punto de partida, las dos líneas de tratamiento basadas en HC (Figura 7) se han denominado para efectos de este trabajo como: P-L1 y P-L2 (Figura 8). El tratamiento de todos los residuos líquidos que incluye el agua de proceso de la mina y el agua residual doméstica se desarrolla mediante humedales construidos de flujo subsuperficial vertical (HC-FV) con dos modos de alimentación ascendente y descendente.

El sistema inicia con pozos decantadores dentro del interior de la mina. Luego por efecto de succión – bombeo llega hasta un amortiguador de agua de 10 m<sup>3</sup> (P-GL-A), donde se aplica cal P24. El agua circula a la piscina de sedimentación principal de 450 m<sup>3</sup>. Su salida presenta una caja de distribución de caudales N°1, que da lugar a la compartimentalización de 2 líneas de tratamiento (Ver figura 8):

- Línea 1 (P-L1) con caudal de diseño de 225 m<sup>3</sup>/día.
- Línea 2 (P-L2) con caudal de diseño de 475 m<sup>3</sup>/día.

**a) Línea 1 (P-L1-E):**

- El HC-FV N°1 se alimenta independientemente recibiendo un aporte de agua residual doméstica de (2,3 m<sup>3</sup>/d). El HC plantado con la especie *Echinochloa polystachya* (pasto alemán) cuenta con un área superficial de 228 m<sup>2</sup> y 160 m<sup>3</sup> de capacidad (Ver Figura 8). El tratamiento fluye al HC-FV N°2.
- Para el HC-FV N°2 el suministro de agua de mina proviene de la caja de distribución de caudales N°1 que comparte la piscina de sedimentación principal. Luego por medio de una tubería pvc de 4" llega hasta dos piscinas de concreto que almacenan 72 m<sup>3</sup> y un deflector entre ellas de 0,20m de profundidad. Para asegurar la eliminación de sólidos suspendidos fluye a un sistema de filtración lento de grava – arena y carbón activado de 4 m<sup>3</sup>. El HC presenta un volumen de 165 m<sup>3</sup> y un área superficial de 210 m<sup>2</sup>, plantado con *Typha latifolia* (Totorá). Además, se incorpora un aporte de agua residual doméstica (aguas grises – negras) de 32 m<sup>3</sup>/d proveniente de los dormitorios del personal.
- Finalmente, el tratamiento de los HC-FV N°1 y HC-FV N°2 (Ver figura 8) fluye en serie hacia el HC-FV N°3 de 198 m<sup>2</sup> de área, y volumen de 190 m<sup>3</sup>, plantado con la especie *Echinochloa polystachya* (pasto alemán). Asimismo, al sistema se incorpora un aporte de agua residual de 14 m<sup>3</sup>/d. El efluente tratado es el punto de muestreo que luego se descarga a la quebrada Sacachispas. Adicional aquí se presenta una estación de bombeo para un sistema de recirculación.

**b) Línea 2 (P-L2-E).**

- Desde la caja de distribución de caudales N°1 desde de la piscina de sedimentación principal fluye por medio de una línea de conducción pvc de 6" recorriendo por gravedad 780 m lineales. Llega a un sistema de filtración lento de grava – arena – carbón activado de (6 m<sup>3</sup>) que facilita la eliminación de sólidos suspendidos. Para asegurar la precipitación de sólidos suspendidos. El flujo se conduce a un estanque compartimentalizado de 32 m<sup>3</sup>. Su salida presenta una caja distribuidora de caudales N°2 que, alimentada en paralelo, que divide el agua en 4 sistemas. Esta línea recibe el aporte de agua residual doméstica (aguas negras y grises) de 65 m<sup>3</sup>/día.

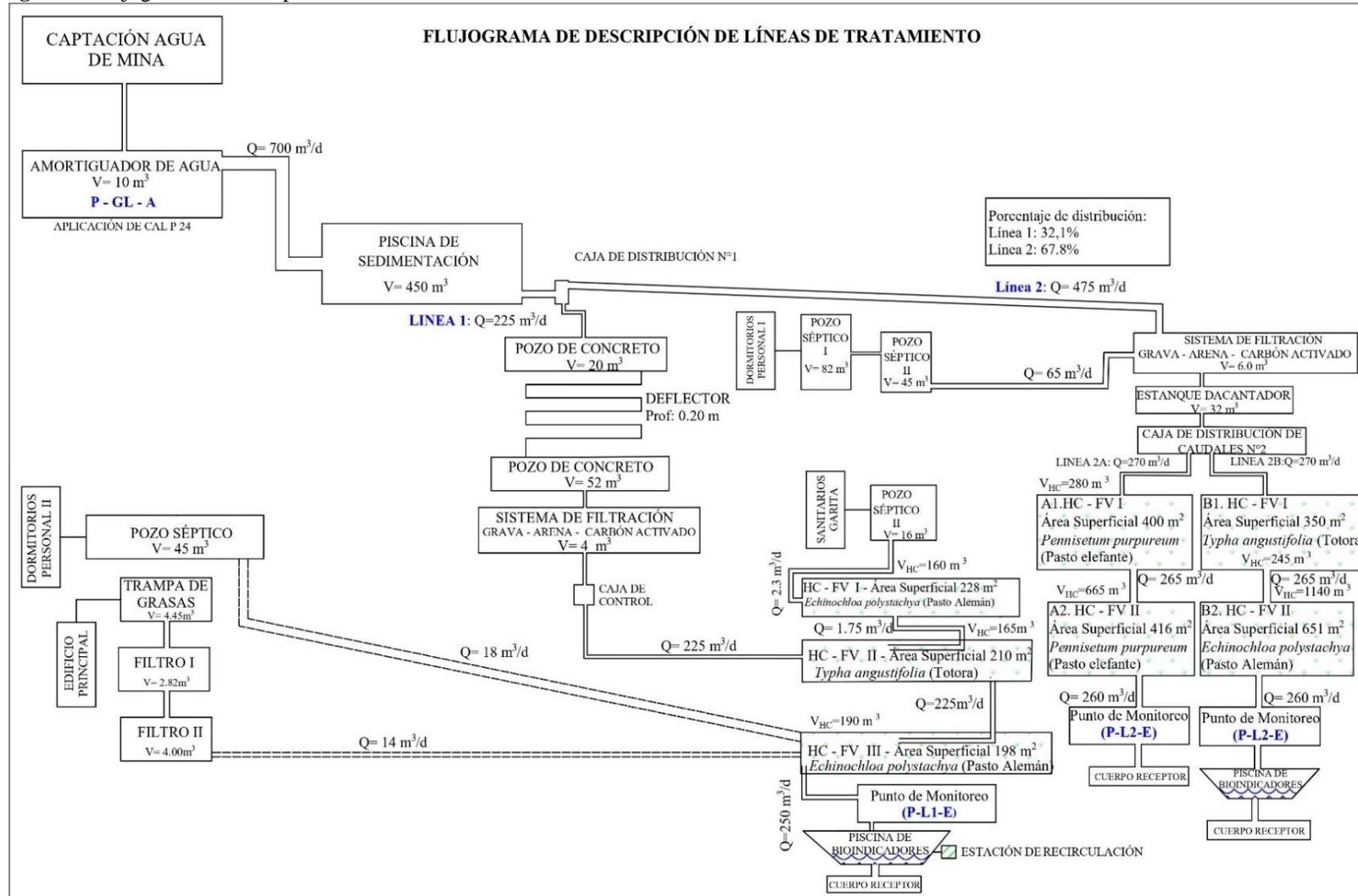
- La línea 2<sup>a</sup> (Humedal A1) (Figura 8) está compuesta por un HC-FV de 400 m<sup>2</sup> de 280 m<sup>3</sup> de capacidad, plantada con *Pennisetum purpureum* (pasto elefante). El tratamiento fluye en serie hacia el humedal A2 que es un HC-FV de 416 m<sup>2</sup>, de capacidad 665 m<sup>3</sup>, también con vegetación de *Pennisetum purpureum* (pasto elefante) saliendo hacia la caja de control siendo el efluente monitoreado. Finalmente, el tratamiento se conduce a una piscina de bioindicadores tilapias. Su descarga se destina a la quebrada Sacachispas.
- La línea 2<sup>b</sup> con el humedal B1 que es un HC-FV I de 350 m<sup>2</sup> plantada con *Typha latifolia* (Totora). El afluente fluye en serie hacia el humedal B2 que es un HC-FV de 651 m<sup>2</sup> de 1140 m<sup>3</sup> de volumen de tratamiento, con vegetación de *Echinochloa polystachya* (pasto alemán), cuya descarga da origen al efluente monitoreado. Posterior se dirige a la quebrada Sacachispas.

### 3.2.2. Flujograma de descripción de las líneas de tratamiento

El siguiente flujograma (Figura 8) expone como se distribuye y/o circula el agua residual en las dos líneas de tratamiento en torno al afluente.

\*(N): **P-GL-A**: Punto global afluente. En la Línea 1 los aportes de agua residual doméstica llegan directamente a los humedales por restricciones topográficas. **HC-FV**: Humedal construido de flujo vertical.

**Figura 8.** Flujoograma de descripción de líneas de tratamiento



**Fuente.** Elaboración propia.

### **3.3. Metodología**

El desarrollo de cada uno de los objetivos específicos de este trabajo se efectuó con el siguiente procedimiento metodológico:

#### **3.3.1. Diseño de investigación**

- El presente estudio es de tipo no experimental, de carácter observacional, ya que se contó con registros de monitoreo, de manera que no se interviene, ni se manipula las variables.
- Es descriptivo, ya que para el afluente (P-GL-A) y sus líneas de tratamiento (P-L1-E; P-L2-E) se caracterizan sus variables físico-químicas a través de diversos parámetros de calidad del agua, y retrospectivo, pues se fundamenta en registros de monitoreo realizados con laboratorios acreditados durante un periodo de ocho años.
- Longitudinal, debido a que se presentan dos semestres de evaluación (Semestre I; Semestre II), particionados en dos periodos: uno, menor a cuatro años (< 4, 2016-2019) y otro, un periodo mayor a cuatro años (>, 2020-2023). Esta partición considera que, los primeros cuatro años corresponden al periodo inicial de funcionamiento, mientras que el segundo periodo, corresponde al periodo de operación de largo plazo.

#### **3.3.2. Enfoque de investigación**

La investigación está alineada bajo el enfoque mixto (cuantitativo y cualitativo). Se aplicaron análisis estadísticos a cada variable de calidad del agua para evaluar la evolución en el funcionamiento del sistema comparando dos periodos de tiempo. Además, se comparará entre líneas de tratamiento, las cuales, como se aprecia en la Figura 8, son independientes entre sí.

#### **3.3.3. Unidad de análisis**

Corresponde a cada muestra de agua (P-GL-A; P-L1-E; P-L2-E) tomada de los puntos de monitoreo establecidos por el Plan de Manejo Ambiental vigente para cada línea de tratamiento de HC (ver Figura 8).

#### **3.3.4. Población**

- Conformada por registros de monitoreo realizados con laboratorios acreditados, abarcando tanto el afluente (P-GL-A), como los efluentes de dos líneas de

tratamiento de HC (P-L1-3; P-L2-E) por un periodo de tiempo comprendido entre 2016 y 2023 (15 monitoreos con 13 parámetros físico-químicos evaluados).

- Los valores de referencia para los análisis de los monitoreos de la minera Sacachispas, son tomados del Acuerdo Ministerial N° 097-A, Registro Oficial Suplemento 387 del 4 de noviembre de 2015 de la Calidad Ambiental, que es la reglamentación vigente en Ecuador, y sobre la cual se realizará el análisis de cumplimiento para responder el objetivo 3.
- La Tabla 5 muestra los parámetros y criterios de calidad de agua evaluados y que serán base para este trabajo.

**Tabla 5.**

*Parámetros y criterios de calidad del agua residual a analizar. Se incluye la clasificación del tipo de parámetro.*

ITEM	Parámetros	Unidad de medida	Tipo de parámetro	Valor Máximo Permisible	Acuerdo Ministerial N° 097-A
1	Aceites y grasas	mg/l	Macroparámetro	30	Tabla 9
2	Demanda química de oxígeno (DQO)	mg/l	Macroparámetro	200	Tabla 9
3	Potencial de hidrógeno (pH)	U de pH	Macroparámetro	6 - 9	Tabla 9
4	Sólidos disueltos totales (SDT)	mg/l	Macroparámetro	3000	Tabla 5
5	Nitratos (NO3)	mg/l	Forma de nitrógeno	50	Tabla 5
6	Nitritos (NO2)	mg/l	Forma de nitrógeno	0.5	Tabla 3
7	Aluminio (Al)	mg/l	Metales	5,0	Tabla 9
8	Arsénico (As)	mg/l	Metales	0,1	Tabla 9
9	Cadmio (Cd)	mg/l	Metales	0,02	Tabla 9
10	Cobre (Cu)	mg/l	Metales	1,0	Tabla 9
11	Hierro (Fe)	mg/l	Metales	10,0	Tabla 9
12	Manganeso (Mn)	mg/l	Metales	2,0	Tabla 9
13	Plomo (Pb)	mg/l	Metales	0,2	Tabla 9

**Fuente:** (Ministerio del Ambiente, 2015)

### 3.3.5. Muestra

La muestra analizada comprende los registros de monitoreo de calidad del agua que fueron efectuados semestralmente por laboratorios acreditados que oscila desde los años 2016 a 2023 (13 parámetros físico - químicos por puntos de muestreo) Tabla 5.

### 3.3.6. Técnicas de recolección de datos

Se empleó la técnica de observación utilizando la información de registros de monitoreos de afluente (P-GL-A) y efluentes (P-L1-E, P-L2-E) para ser procesados estadísticamente. La Tabla 6 muestra los instrumentos de recolección y procesamiento de los datos.

**Tabla 6.**

*Instrumentos de recolección de datos.*

<b>Técnicas</b>
- Monitoreos de calidad del agua entre 2016 a 2023
- Tabulación de los registros de análisis calidad del agua divididos por puntos de muestreo.
- Organización de variables en programa estadístico Infostat 2020.
- Definición de pruebas estadísticas en base a objetivos.
- Registros de mediciones de caudal en los puntos de muestreo.

**Fuente:** Elaboración propia

### 3.4. Metodología para el primer objetivo

- Establecer si se presenta un cambio evolutivo en la operación del sistema comparando dos periodos de funcionamiento.

Se utilizaron los análisis de monitoreos de calidad de agua realizados por la minera Sacachispas durante los años 2016-2023. Primero, para conocer la posible variabilidad de cada variable se realizó la caracterización de medias. Para conocer la evolución y/o cambio evolutivo del tratamiento, se realizó el test de normalidad de Shapiro Wilks (a cada variable de calidad del agua) por cada periodo de tiempo (<4 y >4 años) separadas por los grupos (Tabla 5) (macroparámetros, formas de nitrógeno y metales).

Conocidos los p-valores resultantes del test de normalidad de Shapiro Wilks para determinar la similitud o diferencia entre las dos líneas de tratamiento se aplicó a) para datos con distribución normal, la Prueba t pareada y, b) para datos sin distribución normal, la prueba de Wilcoxon que compararon los dos periodos de tiempo (<4 y >4 años). Todo esto se desarrolló con el software estadístico InfoStat 2020, versión estudiantil.

### 3.4.1. Variables a medir

Se emplearon variables de calidad de agua Tabla 5, utilizando los datos de monitoreo efectuados para (P-GL-A) y líneas de tratamiento (P-L1-E y P-L2-E) por un periodo de tiempo de 8 años dividido en dos periodos “<4 años” y “>4 años”. Se busca establecer si existe variabilidad entre los efluentes entre las dos líneas de tratamiento, así como también, la evolución del tratamiento o alguna diferencia significativa en la eficiencia de desempeño y si estos efluentes dan cumplimiento a la normativa aplicable, junto a la eficiencia de eliminación.

- **Variable Independiente (VI):** periodo de tiempo, dividido en dos categorías “<4 años” y “>4 años”.
- **Variable Dependiente (VD):** parámetros de calidad del agua: aceites y grasas, Al, As, Cd, Cu, DQO, Fe, Mn, NO<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, pH, Pb, SDT (Tabla 5).

### 3.4.2. Operacionalización de variables

La Tabla 7 muestra la operacionalización de las variables por su tipo e indicador.

**Tabla 7.**

*Operacionalización de variables de líneas de tratamiento*

<b>Variable</b>	<b>Indicador</b>	<b>Tipo de variable</b>
Puntos de muestreo	P-GL-A; P-L1-E; P-L2-E	Catagórica nominal
Periodo de tiempo	<4 años (2016-2017-2018-2019) >4 años (2020-2021-2022-2023)	Catagórica nominal
Frecuencia de análisis	Semestre I, semestre II	Catagórica nominal
Aceites y grasas (mg/l)	Resultado de análisis	Numérica continua
Aluminio (mg/l)	Resultado de análisis	Numérica continua
Arsénico (mg/l)	Resultado de análisis	Numérica continua
Cadmio (mg/l)	Resultado de análisis	Numérica continua
Cobre (mg/l)	Resultado de análisis	Numérica continua
Demanda química de oxígeno (mg/l)	Resultado de análisis	Numérica continua
Hierro (mg/l)	Resultado de análisis	Numérica continua
Manganeso (mg/l)	Resultado de análisis	Numérica continua
N-nitratos (mg/l)	Resultado de análisis	Numérica continua
N-nitritos (mg/l)	Resultado de análisis	Numérica continua
pH (Unidades de pH)	Resultado de análisis	Numérica continua
Plomo (mg/l)	Resultado de análisis	Numérica continua
Sólidos disueltos totales (SDT) (mg/l)	Resultado de análisis	Numérica continua

**Fuente:** elaboración propia.

### 3.5. Metodología para el segundo objetivo

- Comparación de la eficiencia de las dos líneas de tratamiento.

Para cuantificar y comparar la eficiencia de las dos líneas de tratamiento, se compararon el afluente (P-GL-A) y efluentes (P-L1-E; P-L2-E) y entre efluentes, por grupo y por cada variable y bajo los dos periodos de estudio “<4 años” y “>4 años”. Para su análisis se empleó a) para datos con distribución normal, la Prueba t pareada, b) para datos sin distribución normal, la prueba de Wilcoxon. De la misma forma, que para el objetivo 1, se empleó el software estadístico InfoStat 2020, versión estudiantil.

### 3.6. Metodología para el tercer objetivo

- Verificar y comparar si las dos líneas de tratamiento cumplen con las regulaciones nacionales.

El análisis comparativo se basó en el cumplimiento normativo del Acuerdo Ministerial N°097-A del 4 de noviembre del 2015; se tomó el límite de diseño establecido en el acuerdo ministerial y se comparó de forma gráfica los registros de cada variable entre 2016 a 2023. Similar a los dos objetivos anteriores, el software estadístico InfoStat 2020 versión estudiantil fue el empleado.

- En cada figura se muestra el límite máximo permisible y, además, se calculó el porcentaje de cumplimiento, y porcentaje de reducción y/o eliminación durante los 8 años de estudio, para ambos periodos en cada parámetro evaluado. Además, se calculó la carga hidráulica de los sistemas, a modo de referencia y como parámetro operativo de los humedales construidos.

#### 3.6.1. Rendimiento y cumplimiento operativo

Se toma en cuenta, la concentración de cada variable de calidad del agua para la entrada y salida para cada línea de tratamiento en (mg/l), para conocer el rendimiento del sistema de tratamiento de calidad del agua por cada variable. De acuerdo con (Humanante et al., 2022) se expresa la eficiencia de eliminación de la siguiente forma:

$$E (\%) = \frac{S_o - S}{S_o} \times 100$$

Donde:

**E (%)**: eficiencia de eliminación.

**S**: concentración de salida del parámetro X (mg/l).

**S<sub>o</sub>**: concentración de entrada del parámetro X (mg/l).

### 3.6.2. Aplicación del afluente – carga hidráulica

**Carga hidráulica:** Para estimar la proyección de diseño del estudio y poder evaluar su eficiencia en el tratamiento, se calculó la tasa de carga hidráulica superficial (HLR), que según, Dotro et al., (2021) es la relación entre el caudal afluente y el área del humedal, expresada en (mm/d). Se realizó utilizando:

- a. Conversión de caudal a litros.
- b. Cálculo de litros por metro cuadrado por día ( $l/m^2/día$ ).

$$HLR \left( \frac{l}{m^2} / día \right) = \frac{\text{caudal} \left( \frac{l}{día} \right)}{\text{superficie} (m^2)}$$

Donde:

**HLR:** carga hidráulica

### 3.7. Procesamiento estadístico

El procesamiento se llevó a cabo con los registros de monitoreo de calidad de agua en el periodo (2016 - 2023). Donde en primer instancia se realizó la caracterización de medias por cada grupo de variables. Luego, para definir si existe o no un cambio evolutivo en las líneas de tratamiento y similitud o diferencia entre ellas "P-L1-E"; "P-L2-E" inicialmente a cada serie de datos, se le realiza una prueba de normalidad (test de Shapiro Wilks) para definir si se aplican o no pruebas paramétricas.

Ante esto, para determinar la similitud o diferencia entre las dos líneas de tratamiento durante el periodo de análisis, según el p-valor obtenido se evaluó la presencia o no de cambios entre líneas "P-L1-E" y "P-L2-E" respecto al afluente (P-GL-A) y entre ellas "P-L1-E" y "P-L2-E". Para los datos con distribución normal se realizó la prueba t y para los datos sin distribución normal, se realizó la prueba de Wilcoxon, procedimiento resumidos en la Tabla 8.

Los datos fueron procesados con el software estadístico InfoStat 2020 versión estudiantil empleando una confiabilidad del 95% ( $\alpha = 0,05$ ). Se designa sí: si el p-valor de cualquiera de las pruebas estadísticas definidas es menor a 0,05 muestra diferencias significativas, por tanto, se rechaza la hipótesis. Mientras, si el p-valor es mayor que 0.05, no hay diferencias significativas, por ende, se acepta la hipótesis.

**Tabla 8.**

*Instrumentos de análisis de datos*

---

<b>Procesamiento</b>
- Test de normalidad de Shapiro Wilks (P-GL-A, P-L1-E, P-L2-E)
- Test de comparación de medias o medianas dependiendo del análisis de normalidad.
- Pruebas pareadas de medias

---

**Fuente:** Elaboración propia

## CAPÍTULO IV

### 4. RESULTADOS

**4.1.** Análisis de calidad del agua para determinar cambios evolutivos en el sistema comparando dos periodos de funcionamiento y su reducción porcentual:

**4.1.1. Afluente (P-GL-A).**

*a) Macro parámetros*

La Tabla 9 expone las características del afluente medidas en el punto P-GL-A. La definición estadística para saber si se comportan como una variable normal o no, se presenta en la Tabla 10. Por su parte, la Tabla 11 muestra el análisis estadístico relacionado con la evolución temporal de los macro parámetros mostrados en la Tabla 9.

**Tabla 9.**

*Características del afluente – macro parámetros (P-GL-A)*

Parámetro	Unidad	Punto de muestreo	Tiempo (años)	Promedio desviación estándar $\pm$	Min	Máx.
DQO	mg/l	P-GL-A	<4	30,12±14,15	20,00	50,00
			>4	26,63±22,27	6,40	78,00
Ac y grasas	mg/l	P-GL-A	<4	7,94±9,05	2,50	22,30
			>4	17,53±7,00	0,20	20,00
pH	u de pH	P-GL-A	<4	7,53±0,77	6,46	9,03
			>4	7,21±0,62	6,21	8,21
SDT	mg/l	P-GL-A	<4	930,11±172,04	625,00	1094,00
			>4	896,53±191,85	716,90	1184,00

**Tabla 10.**

*Prueba de normalidad para el afluente – macro parámetros (P-GL-A).*

Parámetro	Unidad	Punto de muestreo	Tiempo (años)	p-valor (Shapiro Wilks)	¿Se distribuye normalmente, si o no?
DQO	mg/l	P-GL-A	<4	0,0017	No
			>4	0,0191	No
Ac y grasas	mg/l	P-GL-A	<4	<0,0001	No
			>4	<0,0001	No
pH	mg/l	P-GL-A	<4	0,4094	Si
			>4	0,9904	Si
STD	mg/l	P-GL-A	>4	0,2901	Si
			>4	0,0281	No

**Tabla 11.***Resultado de comparación evolutiva del afluente (P-GL-A).*

Parámetro	Unidad	Punto de muestreo	Tiempo (Años)	Tipo de prueba para comparación	p-valor
DQO	mg/l	P-GL-A	<4 >4	Prueba Wilcoxon	0,4246
Ac y grasas	mg/l	P-GL-A	<4 >4	Prueba Wilcoxon	0,2092
pH	mg/l	P-GL-A	<4 >4	Prueba t	0,3812
STD	mg/l	P-GL-A	>4 >4	Prueba Wilcoxon	0.3969

Inicialmente, para el caso de la DQO según la Tabla 9 se muestra una ligera disminución en el periodo mayor a 4 años, que al reportado en el periodo menor a 4 años. Ante aquello, la Tabla 11 indica que no se presentan diferencias significativas ( $p > 0,05$ ).

Los aceites y grasas tienen un promedio que es casi el doble en el periodo superior a 4 años, en comparación con el periodo inferior a 4 años lo cual se muestra en la Tabla 9. No obstante, la Tabla 11 muestra que este incremento no es estadísticamente significativo ( $p > 0,05$ ).

Respecto al pH, el promedio presenta una ligera disminución luego de 4 años. Sin embargo, en ambos periodos su promedio en la caracterización se mantiene dentro de un rango aceptable (6 – 9). Además de acuerdo con la Tabla 11 tampoco se presenta diferencias estadísticamente significativas ( $p > 0,05$ ).

Por su parte, los SDT muestran un promedio ligeramente menor en el periodo posterior a 4 años, frente a lo reportado en el primer periodo Tabla 9. Al igual que los otros parámetros, los valores no presentan diferencias significativas entre los dos periodos comparados ( $p > 0,05$ ) Tabla 11 por tanto, sus condiciones son similares.

En definitiva, para los macro parámetros evaluados en el afluente (P-GL-A) mediante la comparativa, se evidencia una similitud estadística en los 8 años de operación por lo que, no es de esperarse un efecto que genere una variación y/o evolución potencial en los efluentes para los dos periodos evaluados.

## b) Formas de nitrógeno

La Tabla 12 presenta las características de las diferentes formas de nitrógeno evaluadas en el periodo de estudio. Por su parte, la Tabla 13 muestra la clasificación de las variables según su distribución, normal o no normal, y la Tabla 14 proporciona el resultado de comparación estadística entre los dos periodos de estudio en que se dividió el periodo total de 8 años.

**Tabla 12.**

*Características del afluente – Formas de nitrógeno (P-GL-A).*

Parámetro	Unidad	Punto de muestreo	Tiempo (años)	Promedio desviación estándar $\pm$	Min	Máx.
NO <sub>3</sub>	mg/l	P-GL-A	<4	46,19±28,29	9,60	85,51
			>4	67,31±29,58	16,48	109,29
NO <sub>2</sub>	mg/l	P-GL-A	<4	3,02±2,54	0,31	7,06
			>4	2,18±0,81	0,35	2,98

**Tabla 13.**

*Prueba de normalidad para el afluente (P-GL-A).*

Parámetro	Unidad	Punto de muestreo	Tiempo (Años)	p-valor (Shapiro Wilks)	¿Se distribuye normalmente, sí o no?
NO <sub>3</sub>	mg/l	P-GL-A	<4	0,6215	Si
			>4	0,9519	Si
NO <sub>2</sub>	mg/l	P-GL-A	<4	0,3080	Si
			>4	<b>0,0256</b>	No

\*(N): diferencias significativas ( $p < 0,05$ ).

**Tabla 14.**

*Resultado de comparación evolutiva del afluente (P-GL-A).*

Parámetro	Unidad	Punto de muestreo	Tiempo (Años)	Tipo de prueba para comparación	p-valor
NO <sub>3</sub>	mg/l	P-GL-A	<4	Prueba t	0,1828
			>4		
NO <sub>2</sub>	mg/l	P-GL-A	<4	Prueba Wilcoxon	>0,9999
			>4		

Referente al NO<sub>3</sub>, según la Tabla 12 la concentración promedio mayor a 4 años muestra un incremento respecto al primer periodo. Esta diferencia según la Tabla 14, indica que, a pesar del aumento en el periodo superior a 4 años, estos cambios no son significativos ( $p > 0,05$ ).

Respecto al NO<sub>2</sub>, el periodo mayor a 4 años presenta una concentración promedio que se reduce, en comparación al primer periodo reportado (<4 años) Tabla 12. Esto acontece una disminución en los niveles de nitrito con el tiempo. Ante aquello, estos cambios no son estadísticamente significativos (p>0,05) como lo indica la Tabla 14.

De la misma forma que sucedió con los macroparámetros, mediante la comparativa no se evidenció que las formas de nitrógeno presentaran cambios estadísticamente significativos (p>0,05) entre los dos periodos evaluados. Por tanto, en función del tiempo, para el afluente (P-GL-A) estos parámetros permanecen estables durante el análisis.

### c) Metales

La Tabla 15 describe la caracterización de los diferentes metales analizados. A la vez, la Tabla 16 clasifica las variables según su distribución normal o no. Finalmente, la Tabla 17 presenta los resultados de la comparación estadística entre los dos periodos en los que se fraccionaron los 8 años de estudio.

**Tabla 15.**

*Características del afluente, metales (P-GL-A)*

Parámetro	Unidad	Punto de muestreo	Tiempo (años)	Promedio desviación estándar <sup>±</sup>	Min	Máx.
Al	mg/l	P-GL-A	<4	1,36±0,80	0,01	2,29
			>4	1,18±0,87	0,50	3,12
As	mg/l	P-GL-A	<4	0,59±0,37	0,18	1,22
			>4	0,44±0,13	0,28	0,70
Cd	mg/l	P-GL-A	<4	0,01±0,00	0,01	0,01
			>4	0,01±0,0043	1,00E-03	0,01
Cu	mg/l	P-GL-A	<4	0,39±0,20	0,10	0,50
			>4	0,26±0,26	1,00E-03	0,50
Fe	mg/l	P-GL-A	<4	3,60±1,70	0,91	5,68
			>4	4,68±4,16	1,40	14,13
Mn	mg/l	P-GL-A	<4	0,19±0,10	0,08	0,34
			>4	0,42±0,19	0,15	0,70
Pb	mg/l	P-GL-A	<4	0,10±0,00	0,10	0,10
			>4	0,07±0,04	1,00E-03	0,10

**Tabla 16.***Prueba de normalidad para el afluente (P-GL-A)*

Parámetro	Unidad	Línea de tratamiento	Tiempo (años)	p-valor (Shapiro Wiks)	¿Se distribuye normalmente, sí o no?
Al	mg/l	P-GL-A	<4	0,613	Si
			>4	0,0151	No
As	mg/l	P-GL-A	<4	0,6142	Si
			>4	0,5272	Si
Cd	mg/l	P-GL-A	<4	<0,0001	No
			>4	<0,0001	No
Cu	mg/l	P-GL-A	<4	<0,0001	No
			>4	<0,0001	No
Fe	mg/l	P-GL-A	<4	0,5247	Si
			>4	0,0221	No
Mn	mg/l	P-GL-A	<4	0,5568	Si
			>4	0,7023	Si
Pb	mg/l	P-GL-A	<4	<0,0001	No
			>4	<0,0372	No

**Tabla 17.** Resultado de comparación evolutiva del afluente - metales (P-GL-A).

Parámetro	Unidad	Línea de tratamiento	Tiempo (años)	Tipo de prueba para comparación	p-valor
Al	mg/l	P-GL-A	<4	Prueba Wilcoxon	0,3969
			>4		
As	mg/l	P-GL-A	<4	Prueba t	0,3422
			>4		
Cd	mg/l	P-GL-A	<4	Prueba Wilcoxon	0,2462
			>4		
Cu	mg/l	P-GL-A	<4	Prueba Wilcoxon	0,2070
			>4		
Fe	mg/l	P-GL-A	<4	Prueba Wilcoxon	0,8665
			>4		
Mn	mg/l	P-GL-A	<4	Prueba t	<b>0,0133</b>
			>4		
Pb	mg/l	P-GL-A	<4	Prueba Wilcoxon	0,1026
			>4		

\*(N): diferencias significativas (p&lt;0,05).

Como resultado, la Tabla 15 los parámetros Al, As, Cu y Pb, muestran claramente una reducción importante en su concentración en el periodo mayor a 4 años. A pesar

de esto, la Tabla 17 exhibe que no existen diferencias significativas en los dos periodos evaluados ( $p > 0,05$ ) Tabla 17. Por otro lado, el Cd a lo largo del tiempo no presentó variación en su concentración, lo que se condice con el resultado de la Tabla 15.

Por otra parte, la Tabla 15 muestra que para el Fe, y el Mn, el periodo de más de 4 años ( $>4$ ) presentó valores para las concentraciones más altas, respecto al primer periodo de tiempo. Esto se condice con la Tabla 17 para Mn, que expuso diferencias significativas ( $p < 0,05$ ), es decir indica que hubo un cambio a través del tiempo de operación. El Fe presentó un incremento en el segundo periodo, más no presentó diferencias significativas ( $p > 0,05$ ).

En resumen, para el (P-GL-A) estos resultados indican, que las concentraciones de estos metales no presentan ningún cambio estadísticamente significativo en la comparación del periodo total de 8 años ( $p > 0,05$ ). Pues muestran que la concentración en el afluente se comporta estable, es decir, no hay variaciones sustanciales que marquen diferencia para los efluentes.

#### **4.1.2. Efluente (P-L1-E)**

##### ***a) Macro parámetros***

La Tabla 18 presenta la caracterización medida del efluente (P-L1-E). A su vez, la Tabla 19 presenta la definición estadística para verificar si las variables se ajustan o no a una distribución normal. En tanto que, la Tabla 20 muestra un análisis estadístico relacionado con la comparación evolutiva de los macro parámetros en estudio. Adicional, el anexo 1 muestra los porcentajes de reducción para la P-L1.

**Tabla 18.***Características del efluente, macro parámetros (P-L1-E)*

Parámetro	Unidad	Línea de tratamiento	Tiempo (años)	Promedio desviación estándar <sup>±</sup>	Min	Máx.
DQO	mg/l	P-L1-E	<4	45,13±40,7	20,00	132,00
			>4	21,65±9,11	10,00	37,00
Ac y grasas	mg/l	P-L1-E	<4	7,61±8,46	2,50	20,00
			>4	17,53±7,00	0,20	20,00
pH	u de pH	P-L1-E	<4	7,27±0,53	6,26	7,72
			>4	7,04±0,5	6,21	7,66
STD	mg/l	P-L1-E	<4	583±313,24	81,00	914,00
			>4	810,11±724,26	305,70	2560,00

**Tabla 19.***Prueba de normalidad para el efluente (P-L1-E).*

Parámetro	Unidad	Tiempo (años)	p-valor (Shapiro Wilks)	¿Se distribuye normalmente sí o no?
DQO	mg/l	<4	<b>0,0033</b>	Si
		>4	0,6160	No
Ac y grasas	mg/l	<4	<b>&lt;0,0001</b>	<b>Si</b>
		>4	<b>&lt;0,0001</b>	<b>Si</b>
pH	u de pH	<4	0,1261	No
		>4	0,5173	No
STD	mg/l	<4	0,2388	No
		>4	<b>&lt;0,0001</b>	Si

**Tabla 20.***Resultado de comparación evolutiva del afluente (P-L1-E).*

Parámetro	Unidad	Tiempo (años)	Tipo de prueba para comparación	p-valor
DQO	mg/l	<4	Prueba de Wilcoxon	0,1793
		>4		
Ac y grasas	mg/l	<4	Prueba t	0,0699
		>4		
pH	u de pH	<4	Prueba de Wilcoxon	0,3873
		>4		
STD	mg/l	<4	Prueba de Wilcoxon	0,9551
		>4		

La Tabla 18 indica para la DQO una disminución importante para el segundo periodo evaluado (> 4 años), frente a al primer periodo (< 4 años). Además, el sistema mostró una eficiencia del 34,15% en eliminación de DQO (Anexo 1). Tampoco, dio lugar a obtener diferencias significativas como lo indica la Tabla 20.

Por otro lado, para los valores de aceites y grasas según la Tabla 18 no se notó una mejora en el segundo periodo, aunque se presentó una reducción del 94,39% (Anexo 1), esto no representó que sucedieran cambios estadísticamente significativos ( $p>0,05$ ) como lo muestra la Tabla 20.

Para el pH, a pesar de mostrar una reducción en el tiempo (Anexo 1), la Tabla 18 muestra una similitud con valores alrededor de 7,0 para los dos periodos evaluados. Sin embargo, no se obtuvieron diferencias significativas ( $p>0,05$ ) Tabla 20.

Los SDT muestran valores más altos en el segundo periodo, aunque mostró una reducción en un inicio, esta no se mantuvo con el paso del tiempo Tabla 18, ni tampoco se evidencian diferencias estadísticamente significativas ( $p>0,05$ ) Tabla 20. Esto se reflejó con el porcentaje de reducción obtenido de 23,06% (Anexo 1).

En efecto, la comparativa indica que la concentración de cada parámetro no sufre cambios estadísticamente significativos ( $p>0,05$ ) entre estos dos periodos evaluados, por lo que no implicaría para el efluente en análisis diferencias notables en el tiempo, es más en apariencia ocurre una estabilidad por parte de la línea de tratamiento basada en HC-FV.

#### **b) Formas de nitrógeno**

La Tabla 21 presenta la caracterización de las formas de nitrógeno evaluadas. Por otro lado, la Tabla 22 proporciona un análisis sobre si la clasificación se ajusta a una distribución normal o no. Finalmente, la Tabla 23 detalla la comparativa estadística entre los dos periodos de tiempo en que se dividió el periodo total de 8 años.

**Tabla 21.**

*Características del efluente (P-L1-E).*

Parámetro	Unidad	Línea de tratamiento	Tiempo (años)	Promedio $\pm$ desviación estándar	Min	Máx.
NO <sub>3</sub>	mg/l	P-L1-E	<4	19,81 $\pm$ 17,48	0,80	51,44
			>4	25,69 $\pm$ 9,60	10,90	36,50
NO <sub>2</sub>	mg/l	P-L1-E	<4	0,80 $\pm$ 1,32	0,02	3,67
			>4	0,69 $\pm$ 0,62	0,20	1,94

**Tabla 22.***Prueba de normalidad para el efluente (P-LI-E).*

Parámetro	Unidad	Tiempo (años)	p-valor (Shapiro Wilks)	¿Se distribuye normalmente, sí o no?
NO <sub>3</sub>	mg/l	<4	0,4427	No
		>4	0,1420	No
NO <sub>2</sub>	mg/l	<4	0,0020	Si
		>4	0,0341	Si

**Tabla 23.***Resultado de comparación evolutiva del afluente (P-LI-E).*

Variable	Unidad	Tiempo (años)	Tipo de prueba para comparación	p-valor
NO <sub>3</sub>	mg/l	<4	Prueba de Wilcoxon	0,4257
		>4		
NO <sub>2</sub>	mg/l	<4	Prueba t	0,4634
		>4		

\*(N): diferencias significativas (p&lt;0,05).

Para los NO<sub>3</sub> la Tabla 21 apunta un incremento en el tratamiento en el segundo periodo, cuando se compara con el primero, manera que obtuvo un 51,27% de reducción (Anexo 1). En cambio, los valores en NO<sub>2</sub> muestran en su fluctuación una distribución importante evidenciando una mejora en el tiempo, respecto al primer periodo Tabla 21, arrojando un 51,27% (Anexo 1). Dicho estos valores, pese a su disminución, en la Tabla 23 indica que su desempeño del tratamiento no implica cambios estadísticamente significativos a lo largo del tiempo (p>0,05).

En particular, en la comparación evolutiva de las formas de nitrógeno en la línea 1 (P-L1), a través del análisis estadístico en todos sus ocho años se evidencia una similitud estadística (p>0,05) Tabla 23, lo cual no es viable que influya una variación potencial en la línea de tratamiento del HC.

### c) Metales

La Tabla 24 refiere la caracterización de los diferentes metales evaluados. Por otro lado, la Tabla 25 sintetiza si la clasificación se comporta como una distribución normal o no. Mientras que evaluada la normalidad de distribución de datos la Tabla 26 detalla la comparación estadística entre los dos periodos en los que se dividieron los 8 años de análisis.

**Tabla 24.***Características del efluente (P-L1-E)*

Parámetro	Unidad	Línea de tratamiento	Tiempo (años)	Promedio ± desviación estándar	Min	Máx.
Al	mg/l	P-L1-E	<4	0,51±0,44	0,01	1,40
			>4	0,31±0,2	0,05	0,50
As	mg/l	P-L1-E	<4	0,17±0,2	0,03	0,60
			>4	0,08±0,03	0,04	0,12
Cd	mg/l	P-L1-E	<4	0,01±0,00	0,01	0,01
			>4	0,01±0,0043	1,00E-03	0,01
Cu	mg/l	P-L1-E	<4	0,39±0,2	0,10	0,50
			>4	0,26±0,26	1,00E-03	0,50
Fe	mg/l	P-L1-E	<4	1,25±1,29	0,25	3,55
			>4	0,34±0,27	0,10	0,84
Mn	mg/l	P-L1-E	<4	0,09±0,01	0,07	0,11
			>4	0,12±0,15	0,02	0,49
Pb	mg/l	P-L1-E	<4	0,1±0,00	0,10	0,10
			>4	0,07±0,04	1,00E-03	0,10

**Tabla 25.***Prueba de normalidad para el efluente (P-L1-E)*

Parámetro	Unidad	Tiempo (años)	p-valor (Shapiro Wilks)	¿Se distribuye normalmente, sí o no?
Al	mg/l	<4	0,1111	No
		>4	0,0040	Si
As	mg/l	<4	0,0087	Si
		>4	0,9271	No
Cd	mg/l	<4	<0,0001	Si
		>4	<0,0001	Si
Cu	mg/l	<4	<0,0001	Si
		>4	<0,0001	Si
Fe	mg/l	<4	0,0611	No
		>4	0,0225	Si
Mn	mg/l	<4	0,7658	No
		>4	<0,0001	Si
Pb	mg/l	<4	<0,0001	Si
		>4	0,0372	Si

**Tabla 26.***Resultado de comparación evolutiva del afluente (P-L1-E).*

Variable	Unidad	Tiempo (años)	Tipo de prueba para comparación	p-valor
Al	mg/l	<4	Prueba de Wilcoxon	0,3636
		>4		
As	mg/l	<4	Prueba de Wilcoxon	0,4821
		>4		
Cd	mg/l	<4	Prueba t	0,2462
		>4		
Cu	mg/l	<4	Prueba t	0,2070
		>4		
Fe	mg/l	<4	Prueba de Wilcoxon	0,0531
		>4		
Mn	mg/l	<4	Prueba de Wilcoxon	0,8025
		>4		
Pb	mg/l	<4	Prueba t	0,1026
		>4		

Tal como ocurrió con el afluente (P-GL-A), la Tabla 24 surge que para el segundo periodo de análisis (>4 años), a diferencia del primer periodo (<4 años), se presenta una reducción importante para Al (74,97%), As (70,07%), Cu (100%) y Pb (89,54%) (Anexo 1). Por otro lado, para el caso del Fe (54,97%) y Mn (57,64%), los valores del segundo periodo donde se pretendía una mejora fueron más altos que la fase inicial.

Sin embargo, la Tabla 26 indica que para los metales medidos no existen diferencias estadísticamente significativas ( $p > 0,05$ ), por lo que se puede indicar que el sistema de tratamiento de HC en la línea P-L1 ha mostrado un comportamiento estable en lapso estudiado.

#### 4.1.3. Efluente (P-L2-E)

##### a) Macro parámetros

La Tabla 27, muestra el comportamiento del efluente (P-L2-E). Por su parte, la Tabla 28 detalla la estadística utilizada para verificar si las variables siguen o no a una distribución normal. En tanto, la Tabla 29 ofrece un análisis estadístico de la comparación evolutiva de los macro parámetros evaluados. Finalmente, el Anexo 2 muestra el porcentaje de reducción del efluente P-L2.

**Tabla 27.***Características del efluente – macro parámetros.*

Parámetro	Unidad	Línea de tratamiento	Tiempo (años)	Promedio desviación estándar $\pm$	Min	Máx.
DQO	mg/l	P-L2-E	<4	28,57 $\pm$ 14,64	20,00	50,00
			>4	19,53 $\pm$ 8,94	4,00	30,00
Ac y grasas	mg/l	P-L2-E	<4	7,61 $\pm$ 8,46	2,50	20,00
			>4	17,53 $\pm$ 7,00	0,20	20,00
pH	u de pH	P-L2-E	<4	6,98 $\pm$ 0,47	6,29	7,5
			>4	6,96 $\pm$ 0,88	6,13	8,77
STD	mg/l	P-L2-E	<4	603,71 $\pm$ 221,85	162,00	878,00
			>4	654,29 $\pm$ 183,83	386,90	964,00

**Tabla 28.***Prueba de normalidad para el efluente macro parámetros (P-L2-E)*

Parámetro	Unidad	Tiempo (años)	p-valor (Shapiro Wilks)	¿Se distribuye normalmente, sí o no?
DQO	mg/l	<4	<0,0001	Si
		>4	0,3291	No
Ac y grasas	mg/l	<4	<0,0001	Si
		>4	<0,0001	Si
pH	u de pH	<4	0,3766	No
		>4	0,2296	No
STD	mg/l	<4	0,4267	No
		>4	0,5617	No

**Tabla 29.***Resultado de comparación evolutiva del afluente macro parámetros (P-L2-E).*

Parámetro	Unidad	Tiempo (años)	Tipo de prueba para comparación	p-valor
DQO	mg/l	<4	Prueba de Wilcoxon	0,5175
		>4		
Ac y grasas	mg/l	<4	Prueba t	0,0699
		>4		
pH	u de pH	<4	Prueba de Wilcoxon	0,9643
		>4		
STD	mg/l	<4	Prueba de Wilcoxon	0,6370
		>4		

En cuanto a la línea P-L2-E, la Tabla 27 exhibe para la DQO concentraciones mayores en el primer periodo (<4 años), en comparación al segundo período (>4 años), además se muestra una reducción del 89,64% de eliminación en el efluente (Anexo 2). Ante estos resultados, la Tabla 29 se evidencia que no existen diferencias estadísticamente significativas ( $p>0,05$ ).

Para el caso de los aceites y grasas, la Tabla 27 indica que los valores de concentración fueron mayores en el segundo periodo (>4 años), aunque obtuvo un 88,79% de eficiencia de eliminación (Anexo 2). Aparte, la Tabla 29 tampoco se refleja diferencias estadísticamente significativas ( $p>0,05$ ).

El pH por su parte, como lo muestra la Tabla 27 el segundo periodo de estudio (>4 años) presenta una leve disminución en su concentración, a diferencia del primero, aun así, mantuvo sus valores dentro del rango normativo de 6-9. Este parámetro, tampoco experimento diferencias estadísticamente significativas ( $p>0,05$ ) Tabla 29.

Finalmente, los SDT, como lo muestra la Tabla 27 su concentración muestra un incremento en el segundo periodo a diferencia del primero, más aún obtuvo un 28,73% de eficiencia de eliminación (Anexo 2). Aparte, tampoco mostro diferencias estadísticamente significativas ( $p>0,05$ ) Tabla 29.

En particular, los macro parámetros evaluados al igual que la línea (P-L1), la línea (P-L2) se evidenció una similitud estadística en los 8 años de operación ( $p>0,05$ ), es decir, el efluente no sufre cambios y/o evolución en sus periodos de análisis por lo que no implicaría un efecto que cause una variación potencial en el efluente evaluado.

#### ***b) Formas de nitrógeno***

La Tabla 30 presenta la caracterización de las formas de nitrógeno analizadas. Mientras que para conocer si la clasificación se ajusta a una distribución normal o no lo muestra la Tabla 31. Por otro lado, dependiendo de la normalidad de datos la Tabla 32 muestra la comparación estadística entre los dos periodos de tiempo que segmentan el total de 8 años:

**Tabla 30.***Características del efluente, formas de nitrógeno.*

Parámetro	Unidad	Línea de tratamiento	Tiempo (años)	Promedio $\pm$ desviación estándar	Min	Máx
NO <sub>3</sub>	mg/l	P-L2-E	<4	24,64 $\pm$ 10,84	8,00	38,40
			>4	35,88 $\pm$ 16,02	18,88	63,68
NO <sub>2</sub>	mg/l	P-L2-E	<4	0,20 $\pm$ 0,16	0,02	0,47
			>4	0,42 $\pm$ 0,47	0,02	1,44

**Tabla 31.***Prueba de normalidad para el efluente (P-L2-E).*

Parámetro	Unidad	Tiempo (años)	p-valor (Shapiro Wilks)	¿Se distribuye normalmente, sí o no?
NO <sub>3</sub>	mg/l	<4	0,4332	No
		>4	0,3711	No
NO <sub>2</sub>	mg/l	<4	0,4800	No
		>4	0,0687	No

**Tabla 32.***Resultado de comparación evolutiva del afluente (P-L2-E).*

Parámetro	Unidad	Tiempo (años)	Tipo de prueba para comparación	p-valor
NO <sub>3</sub>	mg/l	<4	Prueba de Wilcoxon	0,1414
		>4		
NO <sub>2</sub>	mg/l	<4	Prueba de Wilcoxon	0,2540
		>4		

Para los NO<sub>3</sub> la Tabla 30 muestra una disminución de cerca del 30% en el segundo periodo, a diferencia del primero, esto se refleja en su eficiencia de eliminación de 26,19% en el efluente (Anexo 2). Todo esto no repercute en el tratamiento y no se presentaron diferencias significativas ( $p > 0,05$ ) como indica la Tabla 32.

En lo concerniente a los NO<sub>2</sub>, la Tabla 30 evidencia en su fluctuación una distribución importante evidenciando una mejora en el tiempo, respecto al primer periodo, en sí mostró un 85,75% de reducción en el efluente (Anexo 2). Arrojado estos valores, pese a su incremento, no se obtuvo diferencias significativas ( $p > 0,05$ ) tal como lo muestra la Tabla 32.

De manera puntual, según los resultados para las formas de nitrógeno de la línea P-L2, tal como sucedió en la línea P-L1, no se manifiestan modificaciones ni evolución relevante en el tiempo ( $p>0,05$ ), ante esto, no hay expectativa que una posible variación en el efluente cause impacto para el sistema de tratamiento de esta línea entre los dos periodos de tiempo que segmentan el total de 8 años de estudio.

**c) Metales**

La Tabla 33 presenta la caracterización de los diversos metales analizados. A la vez, la Tabla 34 muestra si la clasificación se comporta como una distribución normal o no. Tanto que, según la normalidad obtenida la Tabla 35 detalla la comparación estadística entre los dos periodos en los que se dividió los 8 años de evaluación. Y, el Anexo 2 el porcentaje de reducción o eficiencia de eliminación respectiva.

**Tabla 33.**

*Características del efluente metales – metales (P-L2-E).*

Parámetro	Unidad	Línea de tratamiento	Tiempo (años)	Promedio desviación estándar $\pm$	Min	Máx
Al	mg/l	P-L2-E	<4	1,29±1,55	0,01	3,96
			>4	0,32±0,21	0,02	0,50
As	mg/l	P-L2-E	<4	0,06±0,04	0,01	0,13
			>4	0,09±0,03	0,04	0,14
Cd	mg/l	P-L2-E	<4	0,01±0,00	0,01	0,01
			>4	0,01±0,0043	1,00E-03	0,01
Cu	mg/l	P-L2-E	<4	0,39±0,20	0,10	0,50
			>4	0,26±0,26	1,00E-03	0,50
Fe	mg/l	P-L2-E	<4	1,36±1,39	0,25	3,54
			>4	0,23±0,09	0,08	0,33
Mn	mg/l	P-L2-E	<4	0,11±0,08	0,07	0,28
			>4	0,08±0,03	0,03	0,12
Pb	mg/l	P-L2-E	<4	0,1±0,00	0,10	0,10
			>4	0,07±0,04	1,00E-03	0,10

**Tabla 34.***Prueba de normalidad para el efluente metales (P-L2-E)*

Parámetro	Unidad	Tiempo (años)	p-valor (Shapiro Wilks)	¿Se distribuye normalmente, sí o no?
Al	mg/l	<4	0,0061	Si
		>4	0,014	Si
As	mg/l	<4	0,8272	No
		>4	0,9824	No
Cd	mg/l	<4	<0,0001	Si
		>4	<0,0001	Si
Cu	mg/l	<4	<0,0001	Si
		>4	<0,0001	Si
Fe	mg/l	<4	0,0319	Si
		>4	0,0476	Si
Mn	mg/l	<4	<0,0001	Si
		>4	0,6868	No
Pb	mg/l	<4	<0,0001	Si
		>4	0,0076	Si

**Tabla 35.***Resultado de comparación evolutiva del afluente (P-L2-E).*

Variable	Unidad	Tiempo (Años)	Tipo de prueba para comparación	p-valor
Al	mg/l	<4	Prueba t	0,1436
		>4		
As	mg/l	<4	Prueba Wilcoxon	0,1120
		>4		
Cd	mg/l	<4	Prueba t	0,2462
		>4		
Cu	mg/l	<4	Prueba t	0,2070
		>4		
Fe	mg/l	<4	Prueba t	<b>0,0491</b>
		>4		
Mn	mg/l	<4	Prueba Wilcoxon	0,7124
		>4		
Pb	mg/l	<4	Prueba t	0,1026
		>4		

\*(N): diferencias significativas (p&lt;0,05).

De manera similar como ocurrió en la línea P-L1, en la Tabla 33 es notable una disminución para el segundo periodo de análisis (>4 años), respecto al primero (<4

años) donde alcanza una disminución y reducción importante en el efluente para Cu (100%), Fe (54,63%), Mn (58,17%) y Pb (89,18%), As (69.69%) (Anexo 2). No obstante, para Al (34,53%). As que pese a presentar reducción, la concentración en el segundo periodo, donde se pretendía una mejora llegó a ser más alta que la inicial Tabla 33. Por otro lado, para Cd y Cu, se mostró el 100% de reducción (Anexo 2). No obstante, para el caso del Fe, si presentó cambios en el tiempo ( $p < 0,05$ ), además presentó un 54.63% de reducción en el efluente (Anexo 2).

En fin, para los metales Al, As, Cd, Cu, Mn, Pb en la línea de tratamiento (P-L2) la Tabla 35 indica que los metales medidos, no presentaron diferencias significativas ( $p > 0,05$ ). Excepto, el Fe, que evidencia una diferencia estadística en los 8 años de operación ( $p < 0,05$ ) de lo cual es viable que se genere un efecto de variación potencial en el efluente, sin embargo, el sistema ha mostrado un comportamiento estable, ya que los niveles mostrados de Fe se encuentran muy por debajo del rango normativo.

#### 4.2. Eficiencia comparativa de afluente frente a efluentes y entre ellos.

Expuestas las Tablas 36, 37 y 38 este apartado se trata comparar entre el afluente y el efluente a cada línea de tratamiento, con el fin de determinar si existe o no una mejora significativa en los diversos parámetros de calidad del agua evaluados. Además, el apartado también busca realizar una comparación entre las líneas de tratamiento con el fin de determinar si ocurren diferencias significativas en sus efluentes.

##### a) *Macroparámetros*

La Tabla 36 muestra el análisis comparativo entre entrada y salida, y entre salidas.

**Tabla 36.**

*Macro parámetros comparación, para los dos periodos de tiempo.*

Parámetro	Unidad	Tiempo (años)	p-valor	p-valor	p-valor
			P-GL-A; P-L1-E	P-GL-A; P-L2-E	P-L1-E; P-L2-E
DQO	mg/l	<4	0,3899	0,3559	0,3383

		>4	0,3703	0,2677	0,0978
Ac y grasas	mg/l	<4	0,3559	0,3559	<b>0,00</b>
		>4	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>
pH	U de pH	<4	0,5273	0,1826	0,3008
		>4	0,2631	<b>0,4743</b>	0,8383
STD	mg/l	<4	<b>0,0441</b>	<b>0,0367</b>	0,8523
		>4	0,7041	<b>0,0332</b>	0,4939

\*(N): diferencias significativas ( $p < 0,05$ ).

Para el caso de la DQO y el pH los datos presentados en la Tabla 36 muestran que para el primer y segundo periodo evaluado no se observan diferencias significativas ( $p > 0,05$ ), es decir no hay variación entre las concentraciones de entrada y salida, así como tampoco entre las dos líneas de tratamiento. Por tanto, su rendimiento se mantiene constante en ambas líneas de tratamiento.

Mientras para la comparativa de entrada y salidas de los aceites y grasas la Tabla 36 indica que en el primer periodo no detectaron diferencias significativas ( $p > 0,05$ ). Excepto, en el segundo donde si se presentan diferencias significativas ( $p < 0,05$ ). Además, se encuentra diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) entre líneas de tratamiento.

La Tabla 36 referente a los SDT, en la comparativa de entrada respecto a las salidas, el primer periodo muestra diferencias significativas ( $p < 0,05$ ), no ocurre lo mismo para el segundo periodo, donde solo (P-L2) presenta diferencias significativas ( $p < 0,05$ ), más no (P-L1) que tampoco presenta diferencias estadísticamente significativas ( $p > 0,05$ ). Por otro lado, el afluente P-GL-A y línea P-L2 junto a la comparativa entre líneas no se evidencian diferencias significativas ( $p > 0,05$ ). Es decir, su desempeño es similar en ambas líneas de tratamiento.

Ante esto, respondiendo al objetivo dos, la comparativa de entrada y salidas y entre ellas para los macro parámetros evaluados, presentan variabilidad entre periodos, sin embargo, la estadística exhibe que las líneas de tratamiento (P-L1 y P-L2) ofrecen una eficiencia de rendimiento similar a lo largo del periodo de estudio ( $p > 0,05$ ).

### b) Formas de nitrógeno

La Tabla 37 ofrece el análisis comparativo entre entrada y salida, y entre salidas.

**Tabla 37.**

*Formas de nitrógeno, comparación para los dos periodos de estudio*

Parámetro	Unidad	Tiempo (años)	p-valor	p-valor	p-valor
			P-GL-A; P-L1-E	P-GL-A; P-L2-E	P-L1-E; P-L2-E

NO <sub>3</sub>	mg/l	<4	<b>0,0279</b>	0,1824	0,611
		>4	<b>0,0026</b>	<b>0,0158</b>	0,0676
NO <sub>2</sub>	mg/l	<4	0,1072	<b>0,0287</b>	0,2800
		>4	<b>0,0046</b>	<b>0,0005</b>	0,1543

\*(N): diferencias significativas (p<0,05).

En lo que concierne, a NO<sub>3</sub> la Tabla 37 en la comparativa del afluente frente a la línea (P-L1) en ambos periodos se muestran diferencias significativas (p<0,05). No obstante, comparando el afluente y el efluente de la línea (P-L2), sólo se obtiene diferencias significativas para el segundo periodo de análisis (p>0,05). Por otro lado, la comparación entre líneas P-L1-E; P-L2-E muestra que no existieron diferencias significativas (p>0,05), lo que indicaría un desempeño similar para este parámetro.

Por otro lado, los NO<sub>2</sub> en la comparación del afluente (P-GL-A) y la línea (P-L1) según la Tabla 37 no se muestran diferencias significativas para el primer periodo (p>0,05), respecto al segundo periodo donde si las presenta (p<0,05). Por otra parte, la comparativa del afluente y el efluente de la línea (P-L2) se encuentran diferencias significativas (p<0,05) en los dos periodos de estudio. En tanto que, entre líneas (P-L1; P-L2) no se evidencian diferencias significativas (p>0,05), por ende, se asume que los NO<sub>2</sub> actúan de forma similar a lo largo del tiempo.

Definitivamente, para las formas de nitrógeno estudiadas, la variabilidad encontrada del afluente, frente a los efluentes (Tabla 37) bajo el periodo de estudio no influyó un efecto positivo en la calidad del agua efluente (p>0,05), demostrando la estabilidad y/o similitud del rendimiento de las dos líneas para mejorar la calidad del efluente minero.

### c) Metales

La Tabla 38 muestra el análisis comparativo entre entrada y salida, y entre salidas.

**Tabla 38.**

*Comparación metales, para los dos periodos de estudio*

Parámetro	Unidad	Tiempo (años)	p-valor	p-valor	p-valor
			P-GL-A; P-L1-E	P-GL-A; P-L2-E	P-L1-E; P-L2-E
Al	mg/l	<4	<b>0,014</b>	0,9043	0,2084
		>4	<b>0,0257</b>	<b>0,0266</b>	0,7657
As	mg/l	<4	<b>0,0281</b>	<b>0,0116</b>	0,2520
		>4	<b>0,0001</b>	<b>0,0001</b>	0,3515

Cd	mg/l	<4	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>
		>4	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>
Cu	mg/l	<4	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>
		>4	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>
Fe	mg/l	<4	0,0573	0,0569	0,6406
		>4	<b>0,0238</b>	<b>0,0187</b>	0,2920
Mn	mg/l	<4	<b>0,0244</b>	0,0951	0,4576
		>4	<b>0,0060</b>	<b>0,0017</b>	0,3942
Pb	mg/l	<4	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>
		>4	0,8126	0,9194	0,7500

\*(N): diferencias significativas ( $p < 0,05$ ).

Según lo reportado en la Tabla 38, la comparativa tras el tiempo de estudio del afluente (P-GL-A) frente al efluente (P-L1) muestra a Al, As, Cd, Cu, Mn presentar diferencias significativas en ambos periodos evaluados ( $p < 0,05$ ). A excepción de Fe, que en el segundo periodo obtiene diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) y Pb que las presenta e igual en el segundo periodo ( $p < 0,05$ ) más no en el primero ( $p > 0,05$ ).

Por su parte, la Tabla 38 comparando el afluente (P-GL-A) y efluente (P-L2) presentan diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) el As, Cd, Cu en los dos periodos de estudio. Mientras que el Al, Fe, Mn en el primer periodo no muestran diferencias significativas ( $p > 0,05$ ), sin embargo, el segundo periodo si reporta variaciones significativas ( $p < 0,05$ ). Por otra parte, para el plomo (Pb) en el primer periodo se observan diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) entre el afluente (P-GL-A) y efluentes (P-L1-E; P-L2-E). En contraste, en el segundo periodo, no se muestra diferencias significativas ( $p > 0,05$ ) en la comparativa entre entrada y salida, y entre salidas.

Sumado a esto, la comparativa entre líneas como lo detalla la Tabla 38, indica que, solo Cd, Cu exhiben diferencias significativas en ambos periodos de estudio ( $p < 0,05$ ). Mientras que Al, As, Fe, Mn reportan que no existen diferencias significativas ( $p > 0,05$ ), modo que, Cd y Cu si las presentan ( $p < 0,05$ ).

En síntesis, en base a la comparativa realizada, y ante la latente variabilidad encontrada por los metales (Tabla 38), no significó alteraciones significativas para el rendimiento de los efluentes ( $p > 0,05$ ). Por tanto, para el manejo del agua residual las líneas de tratamiento P-L1 y P-L2 basadas en HC operan de manera similar a lo largo del lapso de estudio.

#### 4.3. Verificación del cumplimiento normativo de entrada y líneas de tratamiento durante el periodo de estudio.

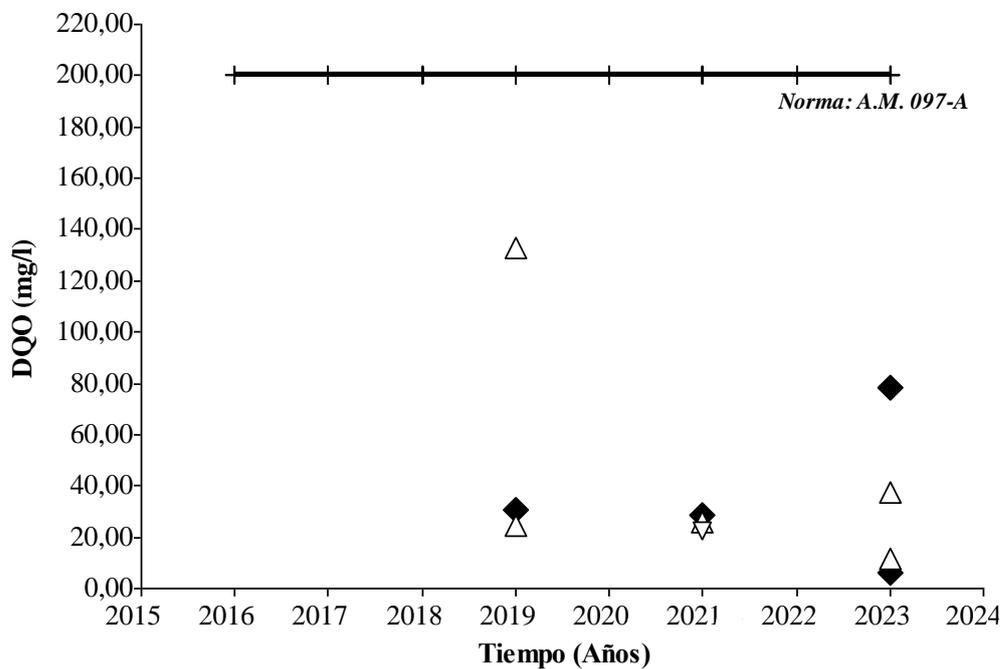
A continuación, las Figuras 9,10,11,12,13,14,15,16,17 ilustran la evolución de la concentración de cada parámetro a lo largo y entre periodos de tiempo (8 años). Por otro lado, la Tabla 39, 40 y 41 exponen el porcentaje de cumplimiento del límite permisible según el Acuerdo Ministerial N°097-A del 4 de noviembre del 2015.

##### a) Macro parámetros

La Figura 9, 10, 11 muestra la evolución temporal de los parámetros DQO, pH, SDT respectivamente. Por su parte, la Tabla 39 resume el porcentaje de cumplimiento para cada uno de los macro parámetros presentados.

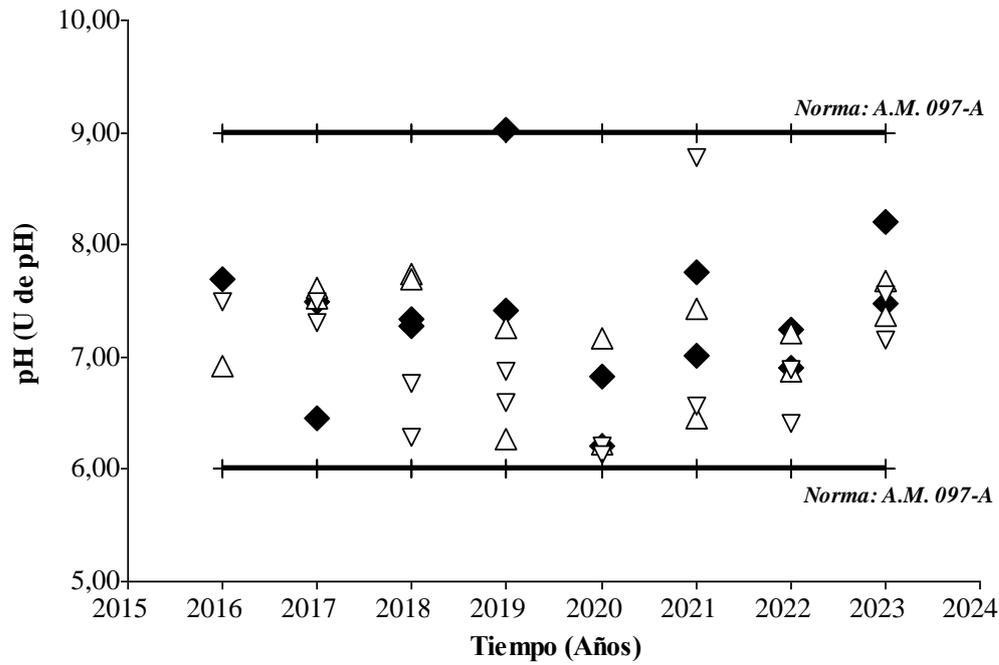
**Figura 9.**

*Evolución temporal de la demanda química de oxígeno (DQO). P-GL-A (◆), efluente línea I P-L1-E (△), y efluente línea II P-L2-E (▽).*



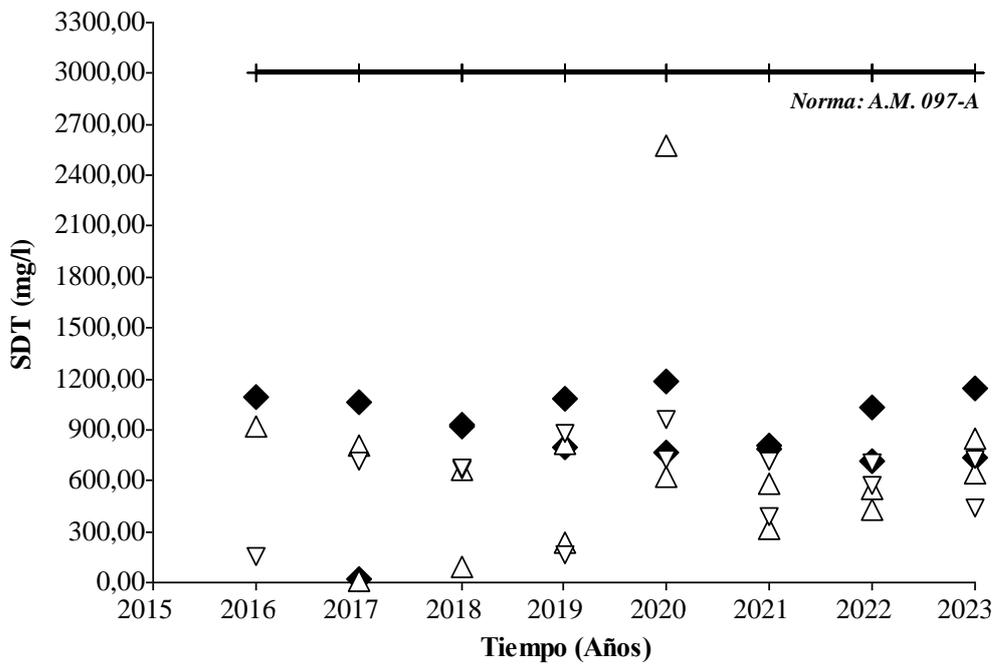
**Figura 10.**

*Evolución temporal del pH. P-GL-A (◆), efluente línea I P-L1-E (△), y efluente línea II P-L2-E (▽).*



**Figura 11.**

*Evolución temporal de sólidos disueltos totales (SDT). P-GL-A (◆), efluente línea I P-L1-E (△), y efluente línea II P-L2-E (▽).*



**Tabla 39.**

*Porcentaje de cumplimiento macro parámetros*

Parámetros	Porcentaje de cumplimiento
------------	----------------------------

	Unidad de medida	Valor Máximo Permisible	P-GL-A	P-L1-E	P-L2-E
Demanda química de oxígeno (DQO)	mg/l	200	100%	100%	100%
pH	Unidades de pH	6-9	93%	100%	100%
Sólidos disueltos totales (SDT)	mg/l	3000	100%	100%	100%

Observando la Figura 9 las líneas de tratamiento (P-L1-E y P-L2-E) los valores de concentración de DQO presentan variabilidad baja a lo largo del análisis a lo ocurrido en el afluente (P-GL-A). Por otro lado, en la Tabla 40 se indica que ambas líneas de tratamiento, e incluso el afluente cumplen con el 100% de límite normativo.

En el caso del pH, a través de la Figura 10 se indica que para el afluente (P-GL-A) y efluentes (P-L1-E y P-L2-E) sus valores de concentración muestran notable variabilidad a lo largo del periodo evaluado. Sin embargo, cumplen con el rango normativo alcanzando el afluente el 93%, y ambas líneas de tratamiento el 100%.

En la Figura 11 para SDT, los valores de concentración a lo largo del periodo estudiado se visualiza una baja variabilidad, mostrando que los efluentes a ambas líneas de tratamiento (P-L1-E y P-L2-E) presentan una mejora respecto al afluente (P-GL-A), excepto en el 2020 alcanza un pico bastante alto. No obstante, en la Tabla 40 se evidencia el 100% cumplimiento en norma para las líneas e incluido el afluente.

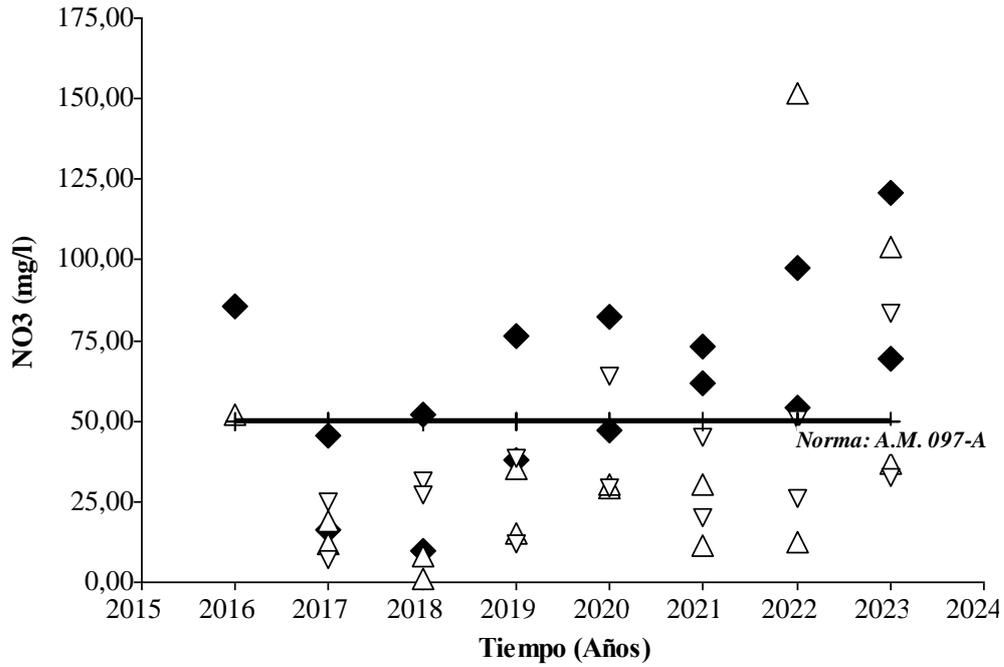
A modo general, en los macro parámetros tras el lapso de estudio se mostró un cumplimiento del 100% para cada línea de tratamiento, e incluso el afluente ya mostraba estar dentro del rango normativo, significando una condición importante de mejora en la calidad del agua residual tratada.

#### ***b) Formas de nitrógeno***

La Figura 12 y 13 muestra la evolución temporal de los parámetros Nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ) y Nitritos ( $\text{NO}_2^-$ ) respectivamente. Por su parte la Tabla 40 resume el porcentaje para cada una de las formas de nitrógeno.

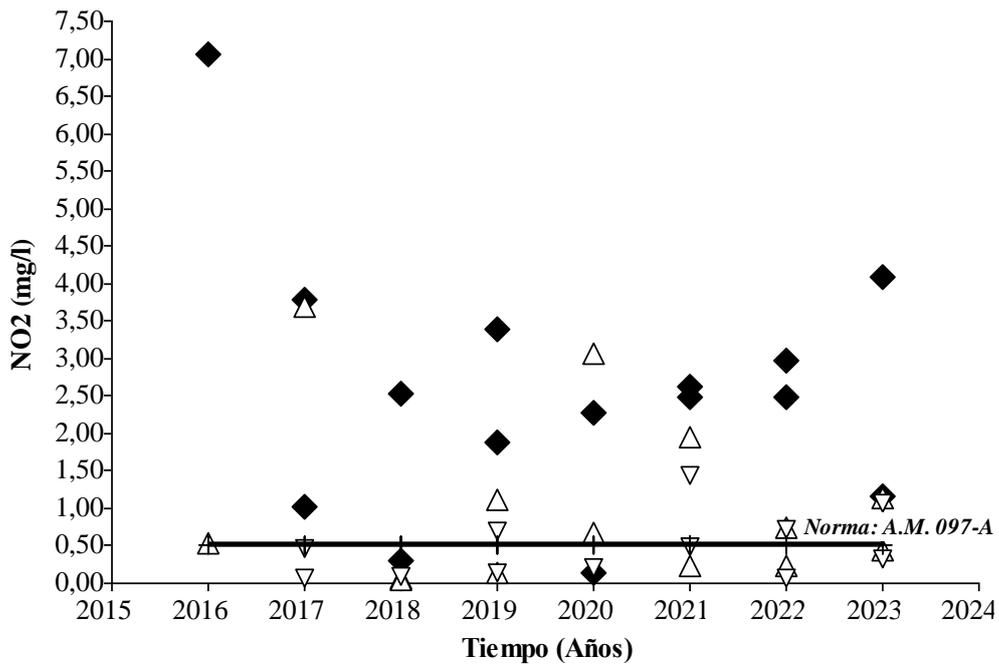
**Figura 12.**

Evolución de nitratos ( $NO_3$ ). P-GL-A ( $\blacklozenge$ ), efluente línea I P-L1-E ( $\triangle$ ), y efluente línea II P-L2-E ( $\nabla$ ).



**Figura 13.**

Evolución en el tiempo de nitritos ( $NO_2$ ). P-GL-A ( $\blacklozenge$ ), efluente línea I P-L1-E ( $\triangle$ ), y efluente línea II P-L2-E ( $\nabla$ ).



**Tabla 40.***Formas de nitrógeno*

Parámetros	Unidad de medida	Periodo de tiempo (años)	Valor Máximo Permisible	Porcentaje de cumplimiento		
				P-GL-A	P-L1-E	P-L2-E
NO <sub>3</sub>	mg/l	<4	50	40%	93%	87%
		>4				
NO <sub>2</sub>	mg/l	<4	0.5	13%	60%	87%
		>4				

La Figura 12 muestra que los valores de NO<sub>3</sub> presentan variabilidad en los 8 años de estudio para el afluente (P-GL-A) como los efluentes (P-L1 y P-L2). Aunque, el afluente en la Tabla 40 se detalla el 40% de cumplimiento normativo, la línea (P-L1-E) mostró un 93% indicando una mejora notable en su salida, a diferencia del 87% obtenido en la línea P-L2.

Según la Figura 13, los NO<sub>2</sub> presentan una variabilidad entre entradas y salidas en el periodo evaluado. De hecho, el afluente (P-GL-A) como se aprecia en la Tabla 40 sólo alcanza el 13% de cumplimiento en norma, a diferencia de los efluentes que mostraron una mejora en la calidad de agua tratada obteniendo el 60% para la P-L1, y 87% para la P-L2 del límite permisible.

En particular, para las formas de nitrógeno tras el tiempo de estudio, pese a encontrar valores altos en el afluente, las formas de nitrógeno en las dos líneas de tratamiento cumplen satisfactoriamente con el marco normativo, este es un factor importante de estabilidad y desempeño de los efluentes en el tiempo mediante HC.

c) Metales

Figura 14.

Evolución en el tiempo de Aluminio (Al). P-GL-A (◆), efluente línea I P-LI-E (△), y efluente línea II P-L2-E (▽).

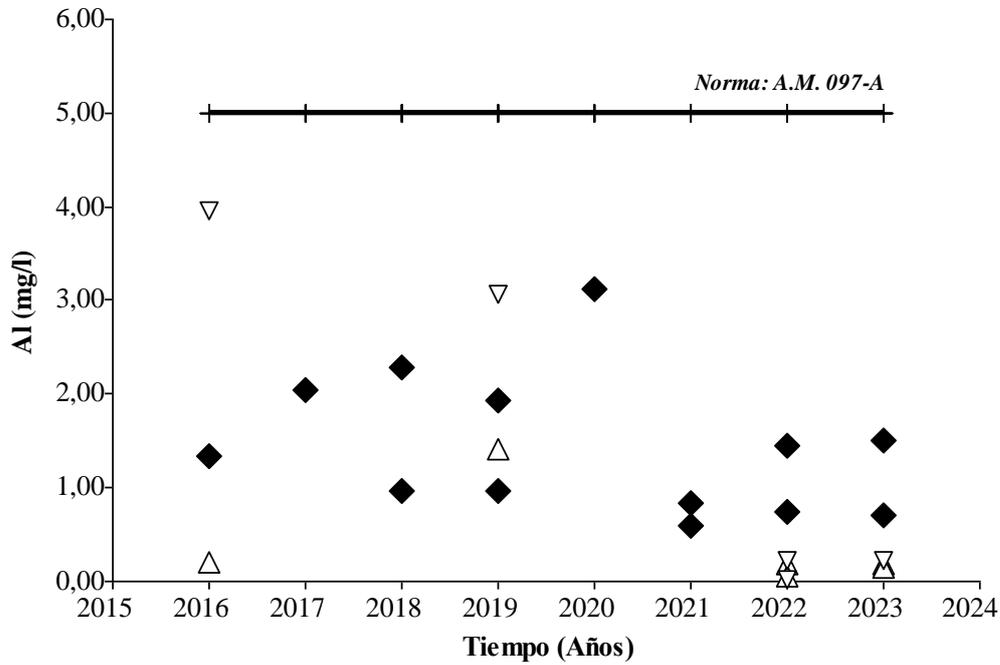
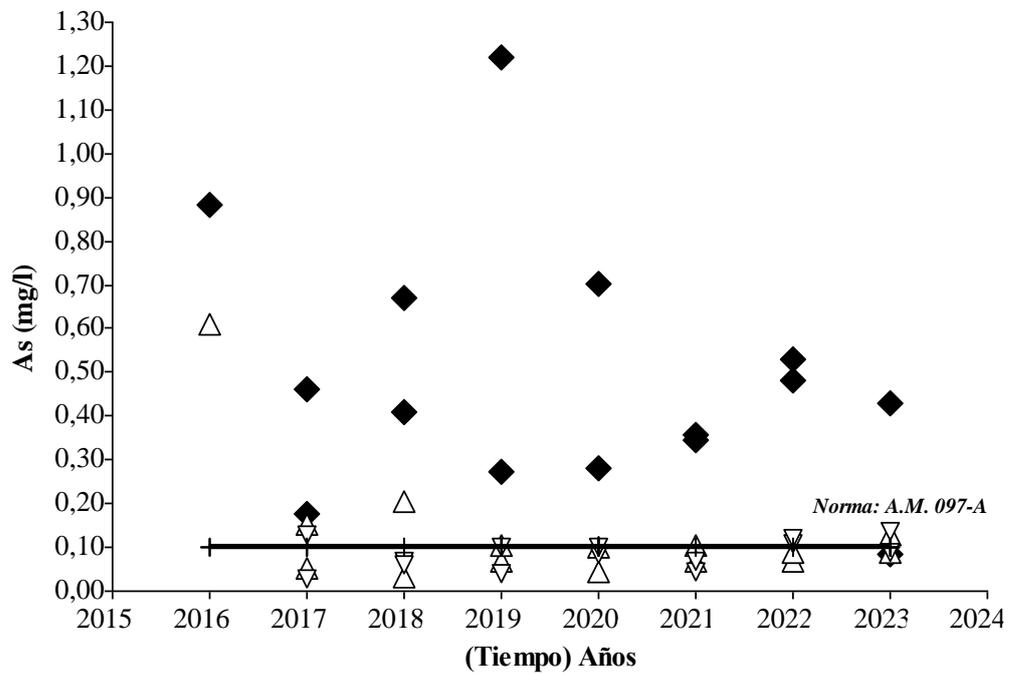


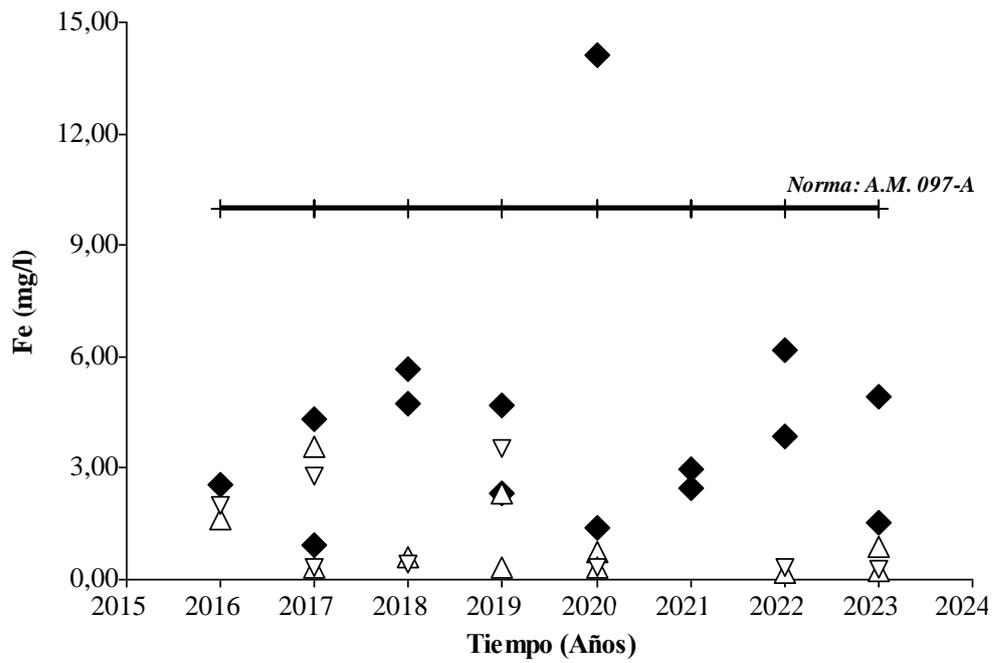
Figura 15.

Evolución en el tiempo de Arsénico (As). P-GL-A (◆), efluente línea I P-LI-E (△), y efluente línea II P-L2-E (▽).



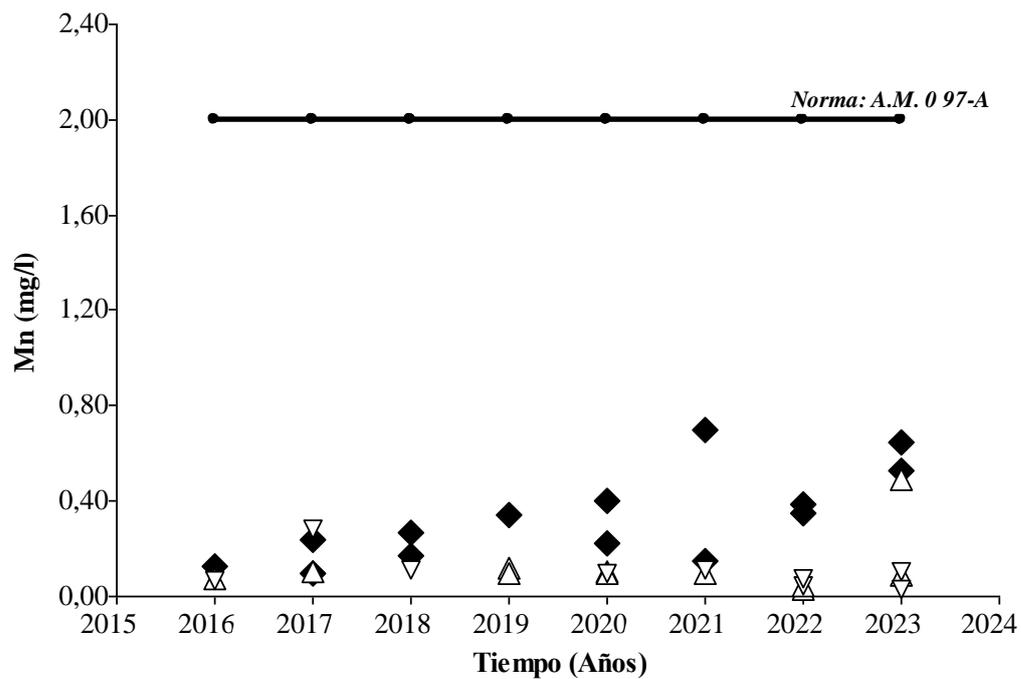
**Figura 16.**

Evolución de la concentración de Hierro (Fe). P-GL-A (◆), efluente línea I P-L1-E (△), y efluente línea II P-L2-E (▽).



**Figura 17.**

Concentración a lo largo de los años de manganeso (Mn). P-GL-A (◆), efluente línea I P-L1-E (△), y efluente línea II P-L2-E (▽).



**Tabla 41.***Porcentaje de cumplimiento metales*

Parámetros	Unidad de medida	Periodo de tiempo (años)	Valor Máximo Permisible	Porcentaje de cumplimiento		
				P-GL-A	P-L1-E	P-L2-E
Aluminio	mg/l	<4	5	100%	100%	100%
		>4				
Arsénico	mg/l	<4	0,1	0%	60%	67%
		>4				
Hierro	mg/l	<4	10	87%	100%	100%
		>4				
Manganeso	mg/l	<4	2	100%	100%	100%
		>4				

En lo que respecta al Al la Figura 14 exhibe poca variabilidad en los puntos de muestreo afluente (P-GL-A) y efluentes (P-L1-E y P-L2-E) en ambos periodos de análisis. En efecto, la Tabla 41 muestra un cumplimiento normativo del 100% para cada punto de muestreo.

La Figura 15 por su parte, exhibe que la concentración de As para la entrada (P-GL-A) a medida que pasa el tiempo excede el LMP alcanzando el 0% de cumplimiento. No obstante, en la Tabla 41 los niveles de concentración muestran a las líneas presentar el 60% para (P-L1), en comparación al 67% de la línea (P-L2). Ante esto, ambas líneas demuestran que si existe una mejora en la calidad del agua residual.

Para el caso del Fe la Figura 16 muestra que, la concentración del afluente (P-GL-A) tiende a superar ampliamente a los efluentes (P-L1 y P-L2) notando una variabilidad en el periodo de estudio. Ante esto, la Tabla 41 muestra un 87% de cumplimiento en norma. Por otro lado, las líneas de tratamiento (P-L1 y P-L2) presentan 100% de cumplimiento, indicando una considerable mejora en la calidad de agua.

En cuanto, al Mn, en la Figura 17 se observa poca variabilidad tanto el ingreso (P-GL-A) como salidas (P-L1 y P-L2). Esto refleja la Tabla 41 que muestra a los tres puntos de muestreo por debajo del LMP, alcanzando el 100% de cumplimiento.

En base a las figuras expuestas, el rendimiento de los metales analizados estuvieron por debajo del rango normativo para las dos líneas de tratamiento Tabla 41. Excepto As en el caso del afluente. No obstante, durante el análisis ambas líneas de tratamiento evidencian una importante mejora de la calidad del agua efluente.

## CAPÍTULO V

### 5. DISCUSIONES

#### 5.1. Aplicación del afluente - carga hidráulica y su efecto en el tratamiento

La Tabla 42 expone el cálculo realizado de la carga hidráulica (mm/d) por cada línea de tratamiento. La carga hidráulica es la división del caudal aplicado en escala diaria entre la superficie del humedal.

**Tabla 42.** Cálculo de carga hidráulica por línea de tratamiento.

Cód. HC	Línea 1 (P-L1-E)			Cód. HC	Línea 2 (P-L2-E)		
	Área (m <sup>2</sup> )	Caudal (m <sup>3</sup> /d)	Carga hidráulica (mm/d)		Área (m <sup>2</sup> )	Caudal (m <sup>3</sup> /d)	Carga hidráulica (mm/d)
HC-FVI	228	2.3	10.0	A1. HC-FVI	400	265	662.5
HC-FVII	210	220	1047.6	A2. HC-FVII	416	260	625
HC-FVIII	198	250	1262.6	B1. HC-FVI	350	265	757.1
				B2. HC-FVII	651	260	399.4

De entrada, un aspecto importante de la operación se relaciona con la forma en que se aplica el agua, lo que se traduce en el parámetro operativo carga hidráulica. Los resultados expusieron una variación importante para la carga hidráulica entre las dos líneas y dentro de cada línea de tratamiento Tabla 42. En este sentido, los resultados comentados previamente de calidad del agua (con eliminación y sin mayor variación de las concentraciones efluentes), corroboran que los HC pueden tolerar variabilidad en cargas hidráulicas y en la calidad del agua efluente (Arias & Brix, 2016) sin afectar su rendimiento (Dotro et al. 2021).

De suma importancia, las altas cargas hidráulicas obtenidas en las dos líneas de tratamiento, en casos hasta de 1,26 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>\*d o m/d para la línea 1, podrían suponer una eficiencia diferente en la capacidad de tratamiento. Stefanakis et al. (2014) recopilaron que tasas altas de carga hidráulica han sido reportadas en Francia llegando a 1-1.4 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>\*d en sistemas de HC-FV de tipo francés. También, los trabajados por Cong Manh et al. (2019) que muestran valores de carga de hasta 2.16 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>\*d. En el estudio de Cong Manh et al. (2019) utilizando modelos experimentales de HC operados con dos cargas hidráulicas obtuvieron valores de carga de hasta 2.16 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>\*d frente a 0.72 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>\*d, logrando esta última mejores resultados indicando

así, que existe una influencia de esta variable en la capacidad depurativa. Pese a esto, en términos generales, los resultados mostraron que la mayoría de los parámetros existe eliminación, lo que además mostró, que existe un cumplimiento por sobre el 50% del tiempo, en la mayoría de parámetros evaluados.

## **5.2. Evolución de las líneas a través de los dos periodos evaluados**

Análogamente, la evaluación de los macroparámetros, formas de nitrógeno y metales para las dos líneas de tratamiento, exhiben una estabilidad operativa en sus 8 años de estudio, es decir no hay variaciones significativas en el tiempo ( $p > 0,05$ ). Estos hallazgos, se corroboran con estudios como el de Martel-Rodríguez et al. (2022) que evaluaron el rendimiento de humedales de tratamiento híbridos 11 años usando seis años de datos, Wu et al. (2017) operando HC con más de ocho años también, empleando 6 años de datos, en sus estudios no experimentaron diferencias significativas ( $p > 0,05$ ) a lo largo del tiempo; resultado similar al obtenido en este trabajo. Según Pat-Espadas et al. (2018) se requerirán rehabilitación cada 5 a 10 años, y una vida útil esperada de alrededor de 20 años. Sin embargo, este estudio muestra que en el segundo periodo no se necesitaría tal rehabilitación.

## **5.3. Comparativa entre las dos líneas de tratamiento**

De modo fundamental, la comparativa entre líneas de tratamiento (P-L1-E, y P-L2-E), para macroparámetros, formas de nitrógeno y para los metales Al, As, Fe y Mn, muestra que ambas líneas de tratamiento exhiben un rendimiento similar a lo largo del tiempo, es decir no hay un efecto temporal que influya en un cambio en los efluentes ( $p > 0,05$ ). Esto se confirma con lo obtenido por Wu et al. (2017); Ali et al. (2018) ya que, no encontraron diferencias significativas entre ambos efluentes comparando el rendimiento en HC híbridos ( $p > 0,05$ ). Sin embargo, Wu et al., (2017) argumentaron que la mejoraría se producía en los años posteriores con la mejora gradual de la biología del sistema. Es cierto que las plantas una vez sean más adaptadas puedan influenciar en el tratamiento. Sin embargo, en este trabajo esto no se puede evidenciar, dada la estabilidad de los efluentes en el tiempo.

Pese a ver recibido altas fluctuaciones en carga hidráulica (Tabla 42), la línea 2 presentó tendencia de mejora, sin presentar cambios significativos en su operación ( $p > 0,05$ ). Esto se puede asociar a una mejor adaptación de la comunidad microbiana, vegetación variable y a mayores superficies, que se traducen en un mayor tiempo de

retención hidráulica. Esto se afianza con Kuehn & Moore. (1995) que indicaron que en 10 años de evaluación de HC, la variación estacional en las concentraciones del efluente está influenciada por el tipo de vegetación. Incluso Xia & Yan (2020) señalan en su estudio que el tamaño en áreas y la ubicación de los HC incide directamente en la descarga de nutrientes y su variación. Por su parte, Nan et al. (2023) que reportaron que en HC con una mayor superficie pueden lograr un mayor rendimiento de tratamiento debido a un TRH más prolongado.

A simple vista, las variaciones en las concentraciones del afluente en el presente estudio, en algunos parámetros, probablemente estén asociados a trabajos de interior de mina mucho más profundos y mayor aporte de agua residual doméstica, producto de mayor personal. Sin embargo, esto no se manifiesta en una variación significativa ( $p < 0,05$ ) de las concentraciones afluentes en el tiempo. Esto sería contrapuesto a Al-Isawi et al. (2017) y De Souza (2023), quienes señalaron que las variaciones en la concentración de los parámetros en las salidas del HC estaban influenciadas por las fluctuaciones de las concentraciones de entrada. Tal vez, una explicación a los resultados de este trabajo sea la gran cantidad de pasos y la combinación de humedales, que muestran un efecto positivo en mantener estable las concentraciones en los efluentes para las dos líneas de tratamiento.

#### **5.4. Cumplimiento normativo por parámetro en líneas de tratamiento**

En síntesis, las variables de estudio en las líneas de tratamiento (P-L1-E; P-L2-E) a lo largo de ocho años cumplieron a plenitud con el límite permisible ecuatoriano. Es más, en el afluente ya algunos parámetros presentaron un porcentaje de cumplimiento del 100% como sucedió en el caso de DQO, aceites y grasas, pH, SDT, Al, Fe, Mn, pero no en el caso de As, NO<sub>2</sub> y NO<sub>3</sub>. Para estos últimos fue claro el efecto depurador que realizan las dos líneas de tratamiento. Además, para las variables que ya cumplían en la entrada, se puede decir que las líneas de tratamiento no deterioran o modifican su calidad, cuando se toma como referencia la legislación ecuatoriana. Este resultado es acorde con lo presentado por Rizzo et al. (2020), quien indica que usando HC para la bodega Cecchi, reportaron que cumplió plenamente el límite de descarga durante todo el período monitoreado (dos años y medio de monitoreo), lo que no solo confirma el presente estudio, sino que también evidencia la idoneidad a largo plazo que presenta la tecnología de HC para mejorar la calidad del agua.

## CAPÍTULO VI

### 6. CONCLUSIONES

En términos generales, después de evaluar el funcionamiento de operación a lo largo del estudio (8 años) de las dos líneas de tratamiento de agua residual (P-L1-E y P-L2-E), en cara al afluente (P-GL-A), y de analizar las variables (DQO, aceites y grasas, pH, SDT, NO<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, Al, As, Cd, Cu, Fe, Mn, Pb), se pudo establecer que no detectan cambios evolutivos importantes en la operación del sistema, dado que no se presentan diferencias significativas en los efluentes ( $p > 0,05$ ), comparando un período inicial de 4 años versus un segundo período de 4 años más, por tanto, no se rechaza la hipótesis nula.

De manera puntual, la comparativa del porcentaje de cumplimiento y la eficiencia de las dos líneas de tratamiento se llegó a determinar que la línea 2 presenta mejor desempeño que la línea 1. Esto se explicó por la presencia de superficies más extensas, menor carga hidráulica, y, mayor tiempo de retención hidráulica. No obstante, ambas líneas redujeron de forma significativa, la concentración frente al afluente, en macroparámetros, formas de nitrógeno y metales.

Finalmente, todas las variables en el estudio para las dos líneas de tratamiento empleando humedales construidos cumplen con los límites permisibles del Acuerdo Ministerial N° 097-A, de la Calidad Ambiental durante los 8 años de operación. Esto muestra que los sistemas de HC-FV en formas combinadas y con diferentes especies vegetales, presentan una estabilidad tratando efluentes mineros a lo largo del tiempo, lo que además demuestra, que aún tienen capacidad para manejar los residuos líquidos del campamento minero Bursal - Sacachispas. Por tanto, este tipo de solución de tratamiento, más de tipo natural; a la luz de la evaluación de este trabajo, podría ser recomendada para su implementación en otros campamentos mineros del Ecuador.

## 7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ali, M., Rousseau, D. P., & Ahmed, S. (2018). A full-scale comparison of two hybrid constructed wetlands treating domestic wastewater in Pakistan. *Journal of Environmental Management*, 210, 349-358. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.01.040>
- Al-Isawi, R., Ray, S., & Scholz, M. (2017). Comparative study of domestic wastewater treatment by mature vertical-flow constructed wetlands and artificial ponds. *Ecological Engineering*, 100, 8-18. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.12.017>
- Almendariz M. (2023). Incidencia de las aguas servidas afectando a los habitantes y productores, Parroquia Izamba- Ambato- Tungurahua. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 7(5), 10663-10686. [https://doi.org/10.37811/cl\\_rcm.v7i5.8686](https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i5.8686)
- Almuktar, S., Abed, S. N., & Scholz, M. (2018). Wetlands for wastewater treatment and subsequent recycling of treated effluent: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(24), 23595-23623. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-2629-3>
- Arias, C. A., & Brix, H. (2016). *Memorias de la III Conferencia Panamericana de Sistemas de Humedales para el Tratamiento y Mejoramiento de la Calidad del Agua. Experiencias, dificultades y ventajas en el establecimiento de humedales construidos en países en vías de desarrollo*, 27-28. <https://www.researchgate.net/publication/318047267>
- Arias, C., & Brix, H. (2003). Humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales. *Revista de Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 13(01248170), 17-24. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=91101302>
- Arias, I., & Sulbarán, N. (2017). Modeling of artificial wetlands using water quality parameters. *Tecnogestión*, 14(1). <https://www.redalyc.org/pdf/911/91101302.pdf>
- Ashraf, M. A., Maah, M. J., Yusoff, I., & Mohamadreza, G. (2011). Proposed design of anaerobic wetland system for treatment of mining waste water at former tin mining catchment. *Scientific Research and Essays*, 6(28). <https://doi.org/10.5897/SRE11.1605>

- Asprilla, W. J., Ramírez, J. S., & Rodríguez, D. C. (2020). Humedales artificiales subsuperficiales: comparación de metodologías de diseño para el cálculo del área superficial basado en la remoción de la materia orgánica. *Ingenierías USBMed*, 11(1), 65-73. <https://doi.org/10.21500/20275846.4558>
- Azcoitia, E. (2012). *Efecto de sobrecargas hidráulicas en el rendimiento de humedales construidos para la depuración de aguas* [Universitat Politècnica de Catalunya]. <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/14592/TFC%20Enrique%20de%20Azcoitia%20Toribio%20GENER%202012.pdf>
- Canet-Martí, A., Grüner, S., Lavrnić, S., Toscano, A., Streck, T., & Langergraber, G. (2022). Comparison of simple models for total nitrogen removal from agricultural runoff in FWS wetlands. *Water Science and Technology*, 85(11), 3301-3314. <https://doi.org/10.2166/wst.2022.179>
- Chen, J., Deng, S., Jia, W., Li, X., & Chang, J. (2021). Removal of multiple heavy metals from mining-impacted water by biochar-filled constructed wetlands: Adsorption and biotic removal routes. *Bioresource Technology*, 331, 125061. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125061>
- Cong Manh, N., Van Minh, P., Tri Quang Hung, N., Thai Son, P., & Minh Ky, N. (2019). A Study to Assess the Effectiveness of Constructed Wetland Technology for Polluted Surface Water Treatment. *VNU Journal of Science: Earth and Environmental Sciences*, 35(2). <https://doi.org/10.25073/2588-1094/vnuees.4372>
- De la Varga, D., Soto, M., Arias, C. A., Van Oirschot, D., Kilian, R., Pascual, A., & Álvarez, J. A. (2017). Constructed Wetlands for Industrial Wastewater Treatment and Removal of Nutrients. En A. Val del Río, J. L. Campos, & A. Mosquera (Eds.), *Technologies for the Treatment and Recovery of Nutrients from Industrial Wastewater*, (IGI Global, pp. 202-230). <https://doi.org/10.4018/978-1-5225-1037-6.ch008>
- De Souza, J. P. (2023). *Long-term performance of a real scale constructed wetland for wastewater treatment* [Tesis de Doctorado, Universidade do Porto]. <https://hdl.handle.net/10216/156762>
- Dong, Y., Wiliński, P. R., Dzakpasu, M., & Scholz, M. (2011). Impact of Hydraulic Loading Rate and Season on Water Contaminant Reductions Within Integrated

Constructed Wetlands. *Wetlands*, 31(3), 499-509. <https://doi.org/10.1007/s13157-011-0176-5>

Dotro, G., Langergraber, G., Molle, p, Nivala, J., Puigagut, J., Stein, O., & Von-Sperling, M. (2021). *Humedales para Tratamiento* (G. Dotro, G. Langergraber, P. Molle, J. Nivala, J. Puigagut, O. Stein, & M. von Sperling, Eds.). IWA Publishing. <https://doi.org/10.2166/9781789062526>

Duran M, B., & Lino G, M. J. (2023). Fitorremediación con *Eichhornia crassipes* en aguas residuales del cantón Jipijapa, Ecuador. *Revista Iberoamericana Ambiente & Sustentabilidad*, 6, e221. <https://doi.org/10.46380/rias.vol6.e221>

El Ágora diario del agua. (2021, noviembre 19). *Solo el 20% del agua residual recibe tratamiento en Latinoamérica*. <https://www.elagoradiario.com/agua/agua-residual-tratamiento-latinoamerica/>

Environmental Protection Agency (EPA). (2015). A handbook of constructed wetlands. U.S. *Environmental Protection Agency* (Vol. 1). <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-10/documents/constructed-wetlands-handbook.pdf>

Etteieb, S., Zolfaghari, M., Magdouli, S., Brar, K. K., & Brar, S. K. (2021). Performance of constructed wetland for selenium, nutrient and heavy metals removal from mine effluents. *Chemosphere*, 281, 130921. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130921>

Friedrichsen, C. N., Monroe, M. C., Daroub, S. H., & Wani, S. P. (2021). Yuck! Plural Valuation of Constructed Wetland Maintenance for Decentralized Wastewater Treatment in Rural India. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.564539>

García-Serrano, J., & Corzo-Hernández, A. (2008). *Depuración con humedales contruidos. Guía práctica de diseño, construcción y explotación de sistemas de humedales de flujo subsuperficial*. Barcelona: Departamento de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental de la Universidad Politécnica de Catalunya. <http://hdl.handle.net/2117/2474>

Hamad, M. (2020). Comparative study on the performance of *Typha latifolia* and *Cyperus Papyrus* on the removal of heavy metals and enteric bacteria from wastewater by

- surface constructed wetlands. *Chemosphere*, 260(127551), 127551. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127551>
- Hassan, I., Chowdhury, S. R., Prihartato, P. K., & Razzak, S. A. (2021). Wastewater Treatment Using Constructed Wetland: Current Trends and Future Potential. *Processes*, 9(11), 1917. <https://doi.org/10.3390/pr9111917>
- Hollowed, M. E. (2012). *Free water surface and horizontal subsurface flow constructed wetlands: a comparison of performance in treating domestic graywater* [Tesis de Maestría, Universidad Estatal de Colorado]. <http://hdl.handle.net/10217/74433>
- Humanante, J., Moreno, L., Grijalva, A., Saldoya, R., & Suárez, J. (2022). Removal Efficiency and impact of wastewater treatment system in the urban and rural sector of the Santa Elena Province. *Manglar*, 19(2), 177-187. <https://doi.org/10.17268/manglar.2022.022>
- Ishaq, H. K., Farid, M., Zubair, M., Alharby, H. F., Asam, Z., Farid, S., Bamagoos, A. A., Alharbi, B. M., Shakoor, M., Ahmad, S. R., Rizwan, M., & Ali, S. (2021). Efficacy of Lemna minor and Typha latifolia for the treatment of textile industry wastewater in a constructed wetland under citric acid amendment: A lab scale study. *Chemosphere*, 283, 131107. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131107>
- Ismail, N. I., Abdullah, S. R., Idris, M., Kurniawan, S. B., Effendi Halmi, M. I., AL Sbani, N. H., Jehawi, O. H., & Hasan, H. A. (2020). Applying rhizobacteria consortium for the enhancement of *Scirpus grossus* growth and phytoaccumulation of Fe and Al in pilot constructed wetlands. *Journal of Environmental Management*, 267, 110643. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110643>
- Jambatoconsult. (2021). *Monitoreo biológico del área minera «Sacachispas» (Código 300780) de la empresa Bursal S.A. (Monitoreo biótico)*. Periodo julio - septiembre.
- Kadlec, R. H., & Wallace, S. (2008). *Treatment Wetlands (segunda edición)*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420012514>
- Khan, U. A., Postila, H., Kujala, K., Heiderscheidt, E., & Ronkanen, A. (2022). Capability of HYDRUS wetland module to simulate flow and nitrogen removal processes in pilot-scale treatment peatlands under frost and no-frost conditions. *Ecological Engineering*, 184, 106790. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2022.106790>

- Kill, K., Grinberga, L., Koskiaho, J., Mander, Ü., Wahlroos, O., Lauva, D., Pärn, J., & Kasak, K. (2022). Phosphorus removal efficiency by in-stream constructed wetlands treating agricultural runoff: Influence of vegetation and design. *Ecological Engineering*, 180, 106664. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2022.106664>
- Knox, A., Paller, M., Seaman, J., Mayer, J., & Nicholson, C. (2021). Removal, distribution and retention of metals in a constructed wetland over 20 years. *Science of The Total Environment*, 796, 149062. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149062>
- Kuehn., E., & Moore., J. (1995). Variability of treatment performance in constructed wetlands. *Water Science and Technology*, 32(3). [https://doi.org/10.1016/0273-1223\(95\)00625-7](https://doi.org/10.1016/0273-1223(95)00625-7)
- Larriva, J. B., & González, O. A. (2016). Cinética de la remoción de DBO5 en humedales con flujo sub-superficial horizontal. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, Vol. 37.No.1, 17-30. <http://scielo.sld.cu/pdf/riha/v38n1/riha02117.pdf>
- Lavigne, R. (2014). *Un pantano Seco Artificial (PSA) Modificado para tratar a las Concentraciones Elevadas de Nitratos producidos en los Procesos del Secado del Efluente de Minas de Oro en Bursal, Pasaje, Ecuador.*
- Liu, M., Li, X., He, Y., & Li, H. (2020). Aquatic toxicity of heavy metal-containing wastewater effluent treated using vertical flow constructed wetlands. *Science of The Total Environment*, 727, 138616. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138616>
- Llagas, W., & Gómez, E. (2006). Diseño de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales en la UNMSM. *Revista del Instituto de Investigaciones FIGMMG*, Vol. 15(1561-0888), 1628-8097. [https://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/publicaciones/geologia/vol9\\_n17/a11.pdf](https://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/publicaciones/geologia/vol9_n17/a11.pdf)
- Martel-Rodríguez, G., Millán-Gabet, V., Mendieta-Pino, C., García-Romero, E., & Sánchez-Ramírez, J. (2022). Long-Term Performance of a Hybrid-Flow Constructed Wetlands System for Urban Wastewater Treatment in Caldera de Tirajana (Santa Lucía, Gran Canaria, Spain). *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(22), 14871. <https://doi.org/10.3390/ijerph192214871>

- Ministerio del Ambiente. (2015). Registro oficial N°387. Acuerdo ministerial 097-A. [https://www.gob.ec/sites/default/files/regulations/2018-09/Documento\\_Registro-Oficial-No-387-04-noviembre-2015.pdf](https://www.gob.ec/sites/default/files/regulations/2018-09/Documento_Registro-Oficial-No-387-04-noviembre-2015.pdf)
- Montero-Vega, F. S., Molina-Cedeño, C. S., Pillco-Herrera, B. M., Sarduy-Pereira, L. B., & Diéguez-Santana, K. (2020). Evaluación del impacto ambiental de la construcción de una planta de tratamiento de aguas residuales. Caso río Pindo Chico, Puyo, Pastaza, Ecuador. *Ciencia, Ambiente y Clima*, 3(1), 23-39. <https://doi.org/10.22206/cac.2020.v3i1.pp23-39>
- Nan, X., Lavrnić, S., Mancuso, G., & Toscano, A. (2023). Effects of Design and Operational Conditions on the Performance of Constructed Wetlands for Agricultural Pollution Control – Critical Review. *Water, Air, & Soil Pollution*, 234(7), 434. <https://doi.org/10.1007/s11270-023-06380-y>
- Ochoa-Rivero, J. M., Olmos-Marques, M. A., Alarcón-Herrera, M. T., Sáenz-Uribe, C. G., & Mora-Orozco, C. (2019). Uso de Humedales Construidos: Remoción de Arsénico. *Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias*, No. 79(978-607-37-1123-4). <https://doi.org/10.11144/Javeriana.iued24.ppsf>
- Odinga, C. A., Swalaha, F. M., Otieno, F. A. O., Ranjith, K. R., & Bux, F. (2013). Investigating the efficiency of constructed wetlands in the removal of heavy metals and enteric pathogens from wastewater. *Environmental Technology Reviews*, 2(1), 1-16. <https://doi.org/10.1080/21622515.2013.865086>
- Omondi, D. O., & Navalía, A. C. (2020). Constructed Wetlands in Wastewater Treatment and Challenges of Emerging Resistant Genes Filtration and Reloading. En *Inland Waters - Dynamics and Ecology*. *IntechOpen*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.93293>
- Padilla-Santillan, N. G., Ortiz-Díaz, E. G., & Estupiñán-Rodríguez, L. D. (2021). System of artificial wetlands in processes of water treatment in the refinery of the canton Esmeraldas, Ecuador. *Polo del Conocimiento*, Vol. 6, N°. 5(2550-682X), 677-692.
- Parde, D., Patwa, A., Shukla, A., Vijay, R., Killedar, D. J., & Kumar, R. (2021a). A review of constructed wetland on type, treatment and technology of wastewater. *Environmental Technology & Innovation*, 21, 101261. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101261>

- Pat-Espadas, A., Loredó, P. R., Amabilis-S, L., Gómez, G., & Vidal, G. (2018). Review of Constructed Wetlands for Acid Mine Drainage Treatment. *Water*, 10(11), 1685. <https://doi.org/10.3390/w10111685>
- Pérez, Y. A., García - Cortés, D., & Jauregui - Haza, U. J. (2022). Humedales construidos como alternativa de tratamiento de aguas residuales en zonas urbanas: una revisión. *Ecosistemas*, 31(1), 2279. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2279>
- Postila, H., Heiderscheidt, E., & Leiviskä, T. (2019). Removal of metals from mine drainage waters by in situ mineral sorbent-based pilot filter systems. *Journal of Environmental Management*, 236, 631-638. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.01.115>
- Rabat, J. (2016). *Análisis de los modelos de diseño de los sistemas naturales de depuración* [Máster Universitario en Gestión Sostenible y tecnologías de Agua, Universidad de Alicante]. [https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/57213/1/Analisis\\_de\\_los\\_modelos\\_de\\_diseno\\_de\\_los\\_sistemas\\_na\\_Rabat\\_Blazquez\\_Jorge.pdf](https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/57213/1/Analisis_de_los_modelos_de_diseno_de_los_sistemas_na_Rabat_Blazquez_Jorge.pdf)
- Rahman, M. E., Bin, H. M., Bin, A. S., Uddin, M. K., Mahmud, K., Abd, S. M., Sheikh A, S., & Shamsuzzaman, S.M. (2020). Design, Operation and Optimization of Constructed Wetland for Removal of Pollutant. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(22), 8339. <https://doi.org/10.3390/ijerph17228339>
- Retta, B., Coppola, E., Ciniglia, C., & Grilli, E. (2023). Constructed Wetlands for the Wastewater Treatment: A Review of Italian Case Studies. *Applied Sciences*, 13(10), 6211. <https://doi.org/10.3390/app13106211>
- Rizzo, A., Bresciani, R., Martinuzzi, N., & Masi, F. (2020). Online Monitoring of a Long-Term Full-Scale Constructed Wetland for the Treatment of Winery Wastewater in Italy. *Applied Sciences*, 10(2), 555. <https://doi.org/10.3390/app10020555>
- Ruiz-López, V., González-Sandoval, M. R., Barrera-Godínez, J. A., Moeller-Chavéz, G., Ramírez-Camperos, E., & Durán-Domínguez, M. C. (2010). Cadmium and zinc removal from a mining reprocessing aqueous stream using artificial wetlands. *Tecnología, Ciencia, Educación*. 25, núm. 1(0186-6036). <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=48215094004>

- Sams, R. (2014). *Modelado numérico de humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales* [Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Catalunya]. <https://core.ac.uk/download/pdf/33345474.pdf>
- Sanjrani, M. A., Zhou, B., Zhao, H., Zheng, Y. P., Wang, Y., & Xia, S. B. (2020). Tratamiento de aguas residuales con sistemas de humedales artificiales y plantas utilizadas en esta tecnología – una revisión. *Applied Ecology and Environmental Research*, 18(1), 107-127. [https://doi.org/10.15666/aeer/1801\\_107127](https://doi.org/10.15666/aeer/1801_107127)
- Secretaría del agua, Agencia y Regulación y control del agua, ministerio del Ambiente, ministerio de salud pública, & Agencia Nacional de Regulación, control y V. S. (2016). *Estrategia Nacional de calidad del agua*. [https://www.controlsanitario.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2019/05/Estrategia-Nacional-de-Calidad-del-Agua\\_2016-2030.pdf](https://www.controlsanitario.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2019/05/Estrategia-Nacional-de-Calidad-del-Agua_2016-2030.pdf)
- Silva, J. A. (2023). Wastewater Treatment and Reuse for Sustainable Water Resources Management: A Systematic Literature Review. *Sustainability*, 15(14), 10940. <https://doi.org/10.3390/su151410940>
- Stefanakis, A., Akratos, C., & Tsihrintzis, V. (2014). Humedales artificiales de flujo vertical. Sistemas de ecoingeniería para aguas residuales y tratamiento de lodos (primera). *Elsevier*. <https://www.nhbs.com/vertical-flow-constructed-wetlands-book>
- Sundara, K., Sundara, K. P., & Ratnakanth, B. (2010). Performance evaluation of waste water treatment plant. *International Journal of Engineering Science and Technology*, Vol. 2 (12) (ISSN: 0975-5462). <https://www.researchgate.net/publication/293822072>
- Tang, Z., Wood, J., Smith, D., Thapa, A., & Aryal, N. (2021). A Review on Constructed Treatment Wetlands for Removal of Pollutants in the Agricultural Runoff. *Sustainability*, 13(24), 13578. <https://doi.org/10.3390/su132413578>
- Terán, C., Jenny Argüello, & Cando, C. (2023). *Boletín Técnico Estadística de Información Ambiental Económica en Gobiernos Autónomos Descentralizados Municipales*. [https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Encuestas\\_Ambientales/Municipios\\_2022/Agua\\_potable\\_alcantarillado/Documento\\_tecnico\\_APA\\_2022VFJA.pdf](https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Encuestas_Ambientales/Municipios_2022/Agua_potable_alcantarillado/Documento_tecnico_APA_2022VFJA.pdf)

- Upadhyay, A. K., Bankoti, N. S., & Rai, U. N. (2016). Studies on sustainability of simulated constructed wetland system for treatment of urban waste: Design and operation. *Journal of Environmental Management*, 169, 285-292. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.01.004>
- Upadhyay, A. K., Singh, N. K., Bankoti, N. S., & Rai, U. N. (2017). Designing and construction of simulated constructed wetland for treatment of sewage containing metals. *Environmental Technology*, 38(21), 2691-2699. <https://doi.org/10.1080/09593330.2016.1273396>
- Vargas, A., Calderón, J., Velásquez, D., Castro, M., & Núñez, D. (2020). Análisis de los principales sistemas biológicos de tratamiento de aguas residuales domésticas en Colombia. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 28(2), 315-322. <https://doi.org/10.4067/S0718-33052020000200315>
- Ventura, D., Ferrante, M., Copat, C., Grasso, A., Milani, M., Sacco, A., Licciardello, F., & Cirelli, G. L. (2021). Metal removal processes in a pilot hybrid constructed wetland for the treatment of semi-synthetic stormwater. *Science of The Total Environment*, 754, 142221. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142221>
- Vera-Puerto, I., Escobar, J., Rebolledo, F., Valenzuela, V., Olave, J., Tijero-Rojas, R., Correa, C., & Arias, C. (2021). Performance Comparison of Vertical Flow Treatment Wetlands Planted with the Ornamental Plant *Zantedeschia aethiopica* Operated under Arid and Mediterranean Climate Conditions. *Water*, 13(11), 1478. <https://doi.org/10.3390/w13111478>
- Vera-Puerto, I., Rojas, L., Contreras, C., Zúñiga, F., López, J., Sangüesa, C., Correa, C., Arias, C., & Valenzuela, M. (2021). Evaluación de humedales construidos con plantas ornamentales para el tratamiento de aguas residuales rurales en la Región del Maule: análisis del potencial de reutilización de sus efluentes en riego. *Aqua-LAC revista del Programa Hidrológico Internacional para América Latina y Caribe*, 13(2) (ISSN 1688-2873), 26-41. <https://aqua-lac.org/index.php/Aqua-LAC/article/view/284/250>
- Vishwakarma, S., & Dharmendra. (2022). A Critical Review on Economical and Sustainable Solutions for Wastewater Treatment Using Constructed Wetland. *Civil and Environmental Engineering Reports*, 32(3), 260-284. <https://doi.org/10.2478/ceer-2022-0040>

- Vymazal, J. (2010). Constructed Wetlands for Wastewater Treatment. *Water*, 2(3), 530-549. <https://doi.org/10.3390/w2030530>
- Waly, M. M., Ahmed, T., Abunada, Z., Mickovski, S. B., & Thomson, C. (2022). Constructed Wetland for Sustainable and Low-Cost Wastewater Treatment: Review Article. *Land*, 11(9), 1388. <https://doi.org/10.3390/land11091388>
- Wang, Q., Hu, Y., Xie, H., & Yang, Z. (2018). Constructed Wetlands: A Review on the Role of Radial Oxygen Loss in the Rhizosphere by Macrophytes. *Water*, 10(6), 678. <https://doi.org/10.3390/w10060678>
- Wicke, D., Vosse, J., & Miehe, U. (2019). Combinando humedales construidos y tratamientos de ingeniería para reutilización del agua, informe WP3, Entregable D3.1. *Kompetenzzentrum Wasser*. <https://kompetenzwasser.de/en/forschung/publikationen/1130>
- Wu, H., Zhang, J., Ngo, H. H., Guo, W., Hu, Z., Liang, S., Fan, J., & Liu, H. (2015). A review on the sustainability of constructed wetlands for wastewater treatment: Design and operation. *Bioresource Technology*, 175, 594-601. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.10.068>
- Wu, S., Wallace, S., Brix, H., Kuschik, P., Kirui, W., Masi, F., & Dong, R. (2015b). Treatment of industrial effluents in constructed wetlands: Challenges, operational strategies and overall performance. *Environmental Pollution*, 201, 107-120. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.03.006>
- Wu, Y., Han, R., Yang, X., Zhang, Y., & Zhang, R. (2017). Long-term performance of an integrated constructed wetland for advanced treatment of mixed wastewater. *Ecological Engineering*, 99, 91-98. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.11.032>
- Xia, Y., & Yan, X. (2020). How Variations in Constructed Wetlands Geography Affect Nutrient Discharge. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 125(2). <https://doi.org/10.1029/2019JG005610>
- Zambrano M, Delgado P, Zambrano, E., & Peñaherrera, S. (2022). Contaminantes biológicos presentes en fuentes de agua del centro-sur de la provincia de Manabí, Ecuador. *Siembra*, 9(2), e4011. <https://doi.org/10.29166/siembra.v9i2.4011>
- Zhong, F., Yu, C., Chen, Y., Wu, X., Wu, J., Liu, G., Zhang, J., Deng, Z., & Cheng, S. (2020). Nutrient Removal Process and Cathodic Microbial Community Composition

in Integrated Vertical-Flow Constructed Wetland – Microbial Fuel Cells Filled With  
Different Substrates. *Frontiers in Microbiology*, 11.  
<https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.01896>

## 8. ANEXOS

### 8.1 Anexo 1.

*Porcentaje de reducción Línea 1 (P-L1-E).*

Parámetros	Unidad de medida	Porcentaje de reducción Línea (P-L1-E)								
		Promedio 2016	Promedio 2017	Promedio 2018	Promedio 2019	Promedio 2020	Promedio 2021	Promedio 2022	Promedio 2023	Promedio total
Aceites y grasas	mg/l	100%	100%	100%	55,16%	100%	100%	100%	100%	94,39%
Aluminio (Al)	mg/l	82,52%	87,80%	63,31%	37,69%	91,99%	61,95%	91,39%	83,13%	74,97%
Arsénico (As)	mg/l	31,65%	52,43%	73,37%	79,02%	86,09%	78,99%	85,01%	74,01%	70,07%
Cadmio (Cd)	mg/l	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100,00%
Cobre (Cu)	mg/l	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100,00%
Demanda química de oxígeno (DQO)	mg/l	75%	75%	100%	-269%	100%	100%	100%	-8%	34,15%
Hierro (Fe)	mg/l	37,50%	-98,17%	92,61%	70,07%	74,87%	94,86%	97,74%	70,25%	54,97%
Manganeso (Mn)	mg/l	48,03%	36,83%	61,66%	27,57%	65,90%	82,39%	91,15%	47,61%	57,64%
N-nitratos NO <sub>3</sub>	mg/l	39,84%	44,56%	60,69%	44,93%	50,61%	35,01%	71,42%	63,06%	51,27%
N-nitritos NO <sub>2</sub>	mg/l	92,78%	-12,18%	91,68%	67,33%	-22,02%	66,90%	90,75%	78,79%	56,75%
Potencial de hidrógeno (pH)	Unidades de pH	6,9%	7,56	7,70	6,76	6,68	6,93	7,03	7,51	7,08%
Plomo (Pb)	mg/l	100%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	29,31%	87,01%	89,54%
Sólidos disueltos totales (SDT)	mg/l	16,45%	14,28%	60,12%	38,91%	-48,46%	40,72%	42,35%	20,12%	23,06%

## 8.2 Anexo 2.

*Porcentaje de reducción Línea 1 (P-L2-E).*

Parámetros	Unidad de medida	Promedio 2016	Porcentaje de reducción Línea 2 (P-L2-E)							Promedio total	
			Promedio 2017	Promedio 2018	Promedio 2019	Promedio 2020	Promedio 2021	Promedio 2022	Promedio 2023		
Aceites y grasas	mg/l	100%	100%	100,00%	10,31%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	88,79%
Aluminio (Al)	mg/l	-195,52%	88%	63,31%	-5,58%	91,99%	61,95%	90,99%	81,25%		34,53%
Arsénico (As)	mg/l	98,87%	78%	86,99%	80,05%	77,66%	86,63%	77,34%	71,95%		69,69%
Cadmio (Cd)	mg/l	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100,00%
Cobre (Cu)	mg/l	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100,00%
Demanda química de oxígeno (DQO)	mg/l	100%	100%	100,00%	67,60%	100,00%	100,00%	100,00%	49,52%		89,64%
Hierro (Fe)	mg/l	22,27%	-56%	93,58%	56,85%	89,93%	94,64%	96,09%	89,85%		54,63%
Manganeso (Mn)	mg/l	47,24%	7%	52,83%	38,24%	67,40%	81,81%	83,62%	87,52%		58,17%
N-nitratos NO <sub>3</sub>	mg/l	90,64%	-21%	-88,46%	41,63%	61,15%	8,17%	49,31%	67,98%		26,19%
N-nitritos NO <sub>2</sub>	mg/l	99,29%	94%	52,58%	87,49%	92,54%	93,35%	84,37%	81,90%		85,75%
Potencial de hidrógeno (pH)	Unidades de pH	7,5%	7,40%	6,53%	6,74%	6,17%	7,67%	6,65%	7,35%		7,00%
Plomo (Pb)	mg/l	100%	100%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	18,92%	94,53%		89,18%
Sólidos disueltos totales (SDT)	mg/l	46,98%	22%	27,96%	37,20%	12,16%	28,92%	23,13%	31,27%		28,73%