



*unl*

## **UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA**

### **FACULTAD AGROPECUARIA Y DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES**

#### **CARRERA DE INGENIERÍA EN MANEJO Y CONSERVACIÓN DEL MEDIO AMBIENTE**

Propuesta de un tratamiento pasivo de DAM en base a un prototipo de dren  
anóxico calizo en el Crucero Nro. 4 de la mina La Veinticuatro, cantón  
Portovelo

Trabajo de Titulación previo a la obtención  
del título de Ingeniero en Manejo y  
Conservación del Medio Ambiente

**AUTOR:**

Nixon José Aguilar Valarezo

**DIRECTORA:**

Ing. Andrea Jackeline Castillo Mg. Sc.

**CODIRECTORA:**

Ing. Helena España Loaiza PhD

LOJA-ECUADOR

2022

## **Certificación del Trabajo de Titulación**

Jackeline Andrea Castillo Villalta, Mg. Sc.

**DIRECTORA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

### **CERTIFICA**

Que he dirigido, asesorado, revisado y corregido el presente trabajo de titulación: “Propuesta de un tratamiento pasivo de DAM en base a un prototipo de dren anóxico en el Crucero Nro. 4 de la mina La Veinticuatro, cantón Portovelo”, de autoría del Señor Nixon José Aguilar Valarezo, previo a la obtención del título de Ingeniero en Manejo y Conservación del medio Ambiente, una vez que el trabajo cumple con todos los requisitos exigidos por la Universidad Nacional de Loja para el efecto, autorizo la presentación para la respectiva sustentación y defensa.

Loja, 10 de mayo de 2022



Firmado digitalmente por  
JACKELINNE ANDREA  
CASTILLO VILLALTA

---

Jackeline Andrea Castillo Villalta, Mg. Sc.  
**DIRECTORA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

## Autoría

Loja, 13 de mayo de 2022

Yo, Nixon José Aguilar Valarezo, declaro ser autor del Trabajo de Titulación: **Propuesta de un tratamiento pasivo de DAM en base a un prototipo de dren anóxico calizo en el Crucero Nro. 4 de la mina La Veinticuatro, cantón Portovelo**, y eximo expresamente a la Universidad Nacional de Loja y a sus representantes jurídicos, de posibles reclamos o acciones legales por el contenido del mismo. Adicionalmente acepto y autorizo a la Universidad Nacional de Loja, la publicación de mi Trabajo de Titulación en el Repositorio Digital Institucional – Biblioteca Virtual.



---

Nixon José Aguilar Valarezo

C.I.: 075059812

Correo electrónico: [nixon.aguilar@unl.edu.ec](mailto:nixon.aguilar@unl.edu.ec)

Celular: 0988376907

**Carta de autorización del Trabajo de Titulación por parte del autor, para la consulta de producción parcial o total y publicación electrónica del texto completo**

Yo, **Nixon José Aguilar Valarezo**, declaro ser autor del Trabajo de Titulación: **Propuesta de un tratamiento pasivo de DAM en base a un prototipo de dren anóxico calizo en el Crucero Nro. 4 de la mina La Veinticuatro, cantón Portovelo**, como requisito para optar el Grado de: **Ingeniero en Manejo y Conservación del Medio Ambiente**, autorizo al Sistema Bibliotecario de la Universidad Nacional de Loja para que, con fines académicos muestre al mundo la producción intelectual de la Universidad a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera en el Repositorio Digital Institucional (RDI).

Los usuarios pueden consultar el contenido de este trabajo en el RDI, en las redes de información del país y del exterior con las cuales tenga convenio la Universidad.

La Universidad Nacional de Loja no se responsabiliza por el plagio o copia del Trabajo de Titulación que realice un tercero.

Para constancia de esta autorización, en la ciudad de Loja a los trece días del mes de mayo del dos mil veinte y dos, firma el autor.



---

**Autor:** Nixon José Aguilar Valarezo

**Cédula de identidad:** 0750598112

**Dirección:** Loja, Barrio La Pradera

**Celular:** 0988376907

**Correo electrónico:** nixon.aguilar@unl.edu.ec

**DATOS COMPLEMENTARIOS**

**Director del Trabajo de Titulación:** Ing. Andrea Castillo Villalta, Mg.Sc.

**Codirectora del Trabajo de Titulación:** Helena España Loaiza, Ph.D.

**Tribunal de Grado:** Ing. Raquel Verónica Hernández Ocampo, Mg. Sc. (presidenta)

Ing. Iván Patricio Burneo Saavedra, PhD.

Ing. Christian Fernando León Celi, PhD.

## **Dedicatoria**

Dedico este trabajo principalmente a Dios, ya que, gracias a su infinita bondad, me permitió seguir adelante, incluso en los momentos más duros de afrontar.

A mis queridos padres Aine, José, a mi hermana Mery Aguilar y a Verónica Pambi quienes con su apoyo incondicional y su bendición permitieron la culminación de mis estudios universitarios.

A mis familiares y amigos que estuvieron apoyándome para cumplir esta meta.

***NIXON JOSÉ AGUILAR VALAREZO***

## **Agradecimiento**

Expreso mis más sinceros agradecimientos a la Universidad Nacional de Loja, Facultad Agropecuaria y de Recursos Naturales Renovables y a la Carrera de Ingeniería en Manejo y Conservación del Medio Ambiente, por ser la guía de mis conocimientos durante mi carrera universitaria.

A mi Directora del Trabajo de Titulación Ing. Andrea Castillo, Mg.Sc. y Codirectora Helena España Loaiza Ph.D. por cada aporte valioso, paciencia y orientación brindada que contribuyeron a la culminación de mi Trabajo de Titulación.

Finalmente, un sincero agradecimiento a mis padres, familiares, compañeros, y todos mis seres queridos que de una u otra manera me apoyaron para alcanzar este objetivo.

***NIXON JOSÉ AGUILAR VALAREZO***

## Índice de contenido

Portada .....	i
Certificación del Trabajo de Titulación .....	ii
Autoría .....	iii
Carta de autorización .....	iv
Dedicatoria .....	v
Agradecimiento.....	vi
Índice de contenido .....	vii
Índice de tablas .....	ix
Índice de figuras .....	x
Índice de anexos .....	xi
1. Título .....	1
2. Resumen .....	2
2.1. Abstract.....	3
3. Introducción .....	4
4. Marco Teórico.....	6
4.1. Minería.....	6
4.2. Tipos y métodos de minería.....	6
4.3. Impactos ambientales del Drenaje Ácido de Mina (DAM) .....	7
4.4. Clasificación de los sistemas de tratamiento para Drenaje Ácido de Mina (DAM)..9	
4.4.1. Tratamiento activo del Drenaje Ácido de Mina (DAM).....	10
4.4.2. Tratamiento pasivo del Drenaje ácido de mina (DAM).....	11
4.5. Normativa legal respecto al DAM en Ecuador. ....	12
4.5.1. Reglamento de actividades mineras.....	12

4.5.2.	Límites máximos permisibles de contaminantes para descarga de efluentes .....	13
5.	Metodología .....	15
5.1.	Área de estudio .....	15
5.2.	Construcción de un prototipo experimental del dren anóxico calizo.....	16
5.3.	Implementación del dren anóxico calizo a escala experimental.....	18
5.3.1.	Caracterización del Drenaje Ácido de mina (DAM) .....	18
5.3.2.	Fase experimental .....	21
5.4.	Planteamiento de una propuesta de tratamiento pasivo del dren anóxico calizo como alternativa de estabilización del Drenaje Ácido de Mina (DAM) en campo.....	23
5.5.	Análisis estadístico.....	26
6.	Resultados .....	27
6.1.	Construcción del dren anóxico calizo experimental .....	27
6.2.	Determinación del pH, conductividad eléctrica, turbidez y presencia de Fe, Cu y Pb del Drenaje ácido de Mina (DAM). .....	29
6.2.1.	Caracterización del DAM. ....	29
6.3.	Propuesta de tratamiento pasivo del dren anóxico calizo como alternativa de estabilización del DAM en campo.....	39
7.	Discusión.....	48
8.	Conclusiones .....	53
9.	Recomendaciones .....	54
10.	Bibliografía .....	55
11.	Anexos .....	63

## Índice de tablas

Tabla 1. Límites máximos permisibles para descargas de efluentes a cuerpos de agua dulce aplicados para drenajes ácidos de mina (DAM). .....	14
Tabla 2. Volumen y tiempo para determinación del caudal. ....	27
Tabla 3. Dimensionamiento del prototipo experimental del dren anóxico calizo. ....	28
Tabla 4. Caracterización del DAM. ....	30
Tabla 5. Media y desviación estándar del pH del DAM medidos en el laboratorio. ....	31
Tabla 6. Media y desviación estándar de la conductividad eléctrica del DAM medidos en el laboratorio. ....	34
Tabla 7. Concentración y porcentaje de remoción de metales Fe, Cu y Pb del DAM tratado medido a las 24 horas. ....	38
Tabla 8. Matriz de revisión bibliográfica sistemática. ....	41
Tabla 9. Matriz de selección de tratamientos complementarios para un dren anóxico calizo a ser construido en campo. ....	42
Tabla 10. Dimensionamiento y materiales complementarios calculados para la construcción del dren anóxico calizo de 5 años de funcionamiento para la mina La Veinticuatro. ....	43
Tabla 11. Costos estimados para la construcción del dren anóxico calizo y la piscina de precipitación de metales en la mina La Veinticuatro. ....	46
Tabla 12. Costos operacionales del dren anóxico calizo en la mina La Veinticuatro. ....	47

## Índice de figuras

Figura 1. diagrama gráfico de un sistema activo combinado, para el tratamiento del drenaje ácido de mina. ....	11
Figura 2. Ubicación de la mina La Veinticuatro, cantón Portovelo.....	15
Figura 3. Determinación del caudal del DAM en campo. ....	16
Figura 4. Relaciones para el dimensionamiento del prototipo experimental.....	17
Figura 5. Registro fotográfico de la construcción del dren anóxico calizo experimental.....	18
Figura 6. Etiqueta para recipientes muestrales de DAM. ....	19
Figura 7. Registro fotográfico del muestreo y toma de datos in situ del DAM de la mina La Veinticuatro.....	19
Figura 8. Registro fotográfico del análisis de acidez y alcalinidad realizados en laboratorio. ....	21
Figura 9. Prototipo experimental construido y acondicionado. ....	28
Figura 10. Prototipo experimental del dren anóxico calizo al inicio del tratamiento del drenaje ácido de mina. ....	29
Figura 11. Medidas repetidas en el tiempo del pH del DT. ....	32
Figura 12. Gráfica de la línea ajustada a los datos de pH medidos en laboratorio. ....	33
Figura 13. pH medido en horas en el DST y DT. ....	34
Figura 14. Medidas repetidas en el tiempo de la conductividad eléctrica del DT. ....	35
Figura 15. Gráfica de la línea ajustada a los datos de conductividad eléctrica medidos en laboratorio. ....	36
Figura 16. Conductividad eléctrica medida en horas del DST y DT. ....	37
Figura 17. Comparación de la reducción de la concentración de Fe, Cu y Pb. ....	38
Figura 18. Propuesta de implementación del dren anóxico calizo para la mina La Veinticuatro. ....	45

## Índice de anexos

Anexo 1. Límites máximos permisibles para descargas de efluentes a cuerpos de agua dulce conforme al Acuerdo Ministerial N.º 097.....	63
Anexo 2. Registro fotográfico de la realización del experimento en el prototipo experimental del dren anóxico calizo. ....	65
Anexo 3. Diseño del prototipo experimental del dren anóxico calizo (dimensionamiento de acuerdo al ancho, largo y profundidad). ....	66
Anexo 4. Resultados del análisis de concentración de metales del DAM del cruceo Nro. 4 de la mina La Veinticuatro medido in situ.....	67
Anexo 5. Análisis de medidas repetidas en el tiempo de pH y tratamiento.....	68
Anexo 6. Prueba de homogeneidad de Varianzas de Mauchly de los datos de pH obtenidos en laboratorio. ....	68
Anexo 7. Esfericidad asumida de acuerdo a los resultados obtenidos de pH en la prueba de Mauchly. ....	69
Anexo 8. Medias y desviaciones estándar del pH del DAM tratado y DAM sin tratar obtenidas con el analizador portátil (n=4).....	69
Anexo 9. Análisis de medidas repetidas en el tiempo de conductividad eléctrica y tratamiento. ....	70
Anexo 10. Prueba de homogeneidad de Varianzas de Mauchly de los datos de conductividad eléctrica obtenidos en laboratorio. ....	70
Anexo 11. Esfericidad asumida de acuerdo a los resultados obtenidos de conductividad eléctrica en la prueba de Mauchly. ....	71
Anexo 12. Medias y desviaciones estándar de conductividad eléctrica del DAM tratado y DAM sin tratar obtenidas con el analizador portátil (n=4). ....	71
Anexo 13. Prueba de homogeneidad de Varianzas de Mauchly de los datos de alcalinidad obtenidos en laboratorio.....	72
Anexo 14. Esfericidad asumida de acuerdo a los resultados obtenidos de alcalinidad en la prueba de Mauchly.....	72

Anexo 15. Análisis de medidas repetidas en el tiempo de alcalinidad y tratamiento. ....	73
Anexo 16. Resultados del análisis de concentración de metales del DAM tratado después de 24 horas.....	74
Anexo 17. Certificación de traducción del Abstract.....	75

## **1. Título**

Propuesta de un tratamiento pasivo de DAM en base a un prototipo de dren anóxico calizo en el  
Crucero Nro. 4 de la mina La Veinticuatro, cantón Portovelo

## 2. Resumen

La generación de drenaje ácido de mina (DAM), es uno de los principales problemas ambientales generados por la actividad minera y exigen un tratamiento adecuado. En la presente investigación se evaluó la técnica pasiva del dren anóxico calizo a escala experimental como alternativa para modificar el pH, conductividad eléctrica, turbidez y presencia de Cu, Fe y Pb del DAM del cruceo Nro. 4 de la mina La Veinticuatro del cantón Portovelo. Para la realización del experimento se recolectaron ocho muestras simples de DAM obtenidas previamente a la misma hora y en un mismo punto del efluente, estas muestras fueron almacenadas a temperatura ambiente en contenedores plásticos de 8 litros, cuatro de ellos (n=4) fueron asignados al azar al grupo experimental y los cuatro restantes (n=4) al grupo de control. La construcción del prototipo experimental tuvo como dimensiones (56,25 cm largo; 15 cm de ancho; 15 cm de profundidad), donde se utilizaron 3,60 kg de roca caliza (n=4) se trató un volumen de DAM de 7,2 L por cada repetición durante 24 horas. El prototipo experimental modificó las condiciones iniciales del DAM, variando el pH de ácido (2,73) a neutro (7,00) al cabo de 96 horas, mientras que a las 24 horas la conductividad eléctrica disminuyó gradualmente (de 2476 uS/cm a 2062,30 uS/cm). Finalmente, el prototipo mostró altos porcentajes de remoción de metales Cu (71%), Fe (76%) y Pb (60%), convirtiéndose en un tratamiento pasivo exitoso que pretende ofrecer una alternativa viable para tratar DAM.

*Palabras clave:* minería subterránea, drenaje ácido de mina, dren anóxico calizo, tratamiento pasivo.

## 2.1. Abstract

The generation of acid mine drainage (AMD) is one of the leading environmental problems generated by mining activity and requires adequate treatment. In the present research, the passive technique of anoxic limestone drainage was evaluated on an experimental scale as an alternative to modifying the pH, electrical conductivity, turbidity, and presence of Cu, Fe, and Pb of the AMD of the Nro.4 cruiser of the La Veinticuatro mine of the Portovelo canton. For the realization of the experiment, eight simple AMD samples obtained previously at the same time were collected. At the same point as the affluent, these samples were stored at room temperature in plastic containers of 8 liters; four ( $n = 4$ ) were randomly assigned s random to the experimental group and the remaining four ( $n=4$ ) to the control group. The construction of the experimental prototype had dimensions (56.25 cm long; 15 cm wide; 15 cm deep), where 3.60 kg of limestone rock ( $n = 4$ ) was used, and a volume of AMD of 7.2 L was treated for each repetition for 24 hours. The experimental prototype modified the initial conditions of the AMD, varying the pH from acid (2.73) to neutral (7.00) after 96 hours, while at 24 hours, the electrical conductivity gradually decreased (from 2476 uS/cm to 2062.30 uS/cm). Finally, the prototype showed high percentages of removal of metals Cu (71%), Fe (76%), and Pb (60%), becoming a successful passive treatment that aims to offer a viable alternative to treat AMD.

*Keywords:* underground mining, acid mine drainage, limestone anoxic drainage, passive treatment.

### 3. Introducción

A nivel mundial la minería subterránea es considerada como una de las principales actividades económicas, no solamente por la cantidad de dinero que aporta, sino también por la generación de empleos que produce directa e indirectamente, sobre todo en áreas donde los habitantes no cuentan con otras fuentes de ingresos o estas son muy limitadas (Li et al., 2018). Bajo este contexto, en el Sur del Ecuador la minería subterránea ha ocasionado graves e irreparables daños en el medio ambiente, específicamente en el distrito minero Zaruma – Portovelo, poniendo en pesadumbre una problemática local y provincial (Vilela et al., 2020). Es así que, en el cantón Portovelo, en el sector La Cascada existe una veta hidrometal conformada por minerales sulfurosos como pirita ( $\text{FeS}_2$ ) y calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ), motivo por el cual se generan efluentes de drenaje ácido de mina (DAM) en las concesiones mineras subterráneas de este sector (Vilela et al., 2020). Por esta razón, en el cruce Nro. 4 de la mina La Veinticuatro se produce contaminación del agua subterránea por DAM, las actividades mineras han generado impactos ambientales negativos por la incorporación de iones metálicos y ácido sulfúrico (Skousen, Ziegmkiewicz y McDonald, 2019).

En las investigaciones realizadas sobre la actividad minera, se considera al drenaje ácido de mina como el segundo mayor problema ambiental global de la historia (Skousen, Ziemkiewicz y McDonald, 2019). La principal fuente de DAM es la oxidación de minerales sulfurosos (pirita o calcopirita), que inicialmente están expuestos al oxígeno, agua y microorganismos, como se muestra en la siguiente reacción:  $\text{FeS}_2 + 7/2 \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{SO}_4^{2-} + 2\text{H}^+$ . Por lo que el DAM ocasiona la disminución del pH en el agua, el aumento de conductividad eléctrica, la turbidez, la presencia de metales pesados y la generación de acidez (Naidu et al., 2019). Por esta razón, la liberación rápida y continua del DAM al ambiente sin ningún tratamiento impacta de forma negativa a las fuentes de agua superficiales y subterráneas, al degradar hábitats acuáticos (Kefeni et al., 2017). Es por ello, que en las últimas décadas las técnicas pasivas (humedales aerobios y anaerobios, drenes anóxicos calizos, drenes óxicos calizos, entre otros) son aquellas construcciones (canales, balsas o piscinas) con materiales alcalinos en su interior que tienen la función de interceptar y tratar el DAM permitiendo la supresión de la acidez, la precipitación de los metales pesados y la eliminación de sustancias contaminantes como sólidos en suspensión, arseniatos, antimoniatos y otros (Sanchez y Ferreyra, 2016).

Una técnica pasiva utilizada es el dren anóxico calizo, que se centra en la evaluación del potencial de neutralización del DAM con diferentes tipos de rocas (caliza, zeolita, filita, entre otras), con esta técnica lo que se pretende es el elevar el pH hasta su neutralidad (pH=7), limitando así la oxidación química de los sulfuros y la actividad bacteriana (Utami et al., 2020). En la presente investigación se obtuvieron resultados positivos como el aumento de pH, reducción de conductividad eléctrica y concentración de metales (Fe, Cu y Pb) lo que permitió cumplir con los límites máximos permisibles de vertido a cuerpos de agua dulce, por esta razón en algunos países de Sudamérica se emplean los drenes anóxicos calizos con exitosos resultados desde el momento en que el DAM entra en contacto con la roca caliza.

La presente investigación tuvo un alcance experimental, se evaluó el comportamiento de los parámetros del pH, la conductividad eléctrica, la acidez o la alcalinidad, la turbidez y la presencia de metales del drenaje ácido de mina tratados con la técnica pasiva del dren anóxico calizo bajo condiciones establecidas. Asimismo, se generaron una serie de resultados experimentales que aportarán al desarrollo de tratamientos pasivos del DAM en múltiples concesiones mineras existentes en la zona Sur y en el país como Elipe, Toscón Blanco, Pacchapamba, Miranda Alto, entre otras. Es por ello, que en el presente estudio se planteó como objetivo general evaluar la técnica pasiva del dren anóxico calizo a escala experimental como alternativa para modificar el pH, conductividad eléctrica, turbidez y presencia de Fe, Pb y Cu del drenaje ácido de mina del crucero Nro. 4 de la mina La Veinticuatro del cantón Portovelo. Además, se plantearon tres objetivos específicos, el primero construir un prototipo experimental del dren anóxico calizo para estabilizar el drenaje ácido de mina del crucero Nro. 4 de la mina La Veinticuatro, el segundo determinar la variación del pH, conductividad eléctrica, turbidez y presencia de Fe, Pb y Cu del drenaje ácido de mina posterior al tratamiento con el prototipo del dren anóxico calizo y finalmente proponer un tratamiento pasivo de drenaje ácido de mina para la mina La Veinticuatro usando un dren anóxico calizo.

## **4. Marco Teórico**

### **4.1. Minería**

La minería es la actividad industrial, comercial y económica basada en la exploración, explotación y extracción de minerales metálicos y no metálicos que se encuentran en el suelo y en el subsuelo (Li et al., 2018). Para la producción de recursos minerales y económicos, la minería lleva a cabo una serie de fases como la exploración, explotación, extracción y aprovechamiento de metales o minerales del suelo por medio de maquinaria pesada o artesanal. Sin embargo, la minería durante estas fases genera una gran cantidad de residuos contaminantes que afectan al medio ambiente que nos rodea (Salas, 2017).

### **4.2. Tipos y métodos de minería**

De acuerdo a la Ley de Minería (2009) en Ecuador se realizan cuatro tipos de minería, la artesanal, pequeña minería, mediana minería y minería a gran escala, y la extracción de minerales se realiza con dos métodos, el subterráneo y a cielo abierto.

La minería artesanal que se denomina de sustento, se realiza para cubrir necesidades básicas individuales o familiares. Para el 2016 el Plan Nacional de Desarrollo del Sector Minero en Ecuador estimó que el 22 % de la producción metálica de oro provino de minería artesanal, se considera a este tipo de minería como un pilar fundamental de la economía. Sin embargo, los daños ambientales que produce son irreversibles, ya que no se requieren estudios geológicos y ambientales obligatorios, por lo que en ninguno de sus procesos se preservan los recursos naturales (Ministerio de Energía y Recursos Naturales no Renovables, 2020).

La Ley de Minería (2009) menciona que la pequeña minería es aquella que contempla el área de la concesión, volumen de procesamiento, producción, inversión y tecnología para explotar hasta 300 toneladas métricas de material minero por día. FMAM (2020) afirma que, en Ecuador en el año 2014, la pequeña minería representó un 78% de la producción total metálica de oro. En esta minería la cantidad de producción mineral es elevada, requiere maquinaria pesada y produce impactos en el medio ambiente principalmente en el recurso hídrico, ya que el agua es llevada de vertientes y pozos para actividades de exploración, explotación y procesamiento sin ningún tipo de tratamiento, devolviendo al ambiente agua contaminada.

En Ecuador la mediana minería es aquella actividad que en razón del tamaño y tipo de los yacimientos de minerales metálicos y no metálicos llega a cuantificar reservas que permitan efectuar la explotación de las mismas sobre el volumen de procesamiento establecido para el régimen especial de pequeña minería (10 toneladas/día) y hasta el volumen establecido en los estatutos pertinentes (301 toneladas/día) (Rea, 2017).

Finalmente, la minería a gran escala es aquella que supera los volúmenes máximos de material mineral establecidos para la modalidad de mediana minería (301 toneladas/día). En los últimos años en Ecuador se ha incrementado la inversión extranjera para minería a gran escala, sin embargo las transnacionales han venido dejando desazón y contaminación en áreas de proyectos macro establecidos en el país (Rea, 2017), por tal motivo, FIDH (2010) considera que este tipo de minería deteriora los cuerpos de agua generando pérdida de calidad ambiental. A pesar de que este tipo de minería conlleva previos estudios topográficos y mineralógicos, no se efectúa un sólido estudio de impacto ambiental o el mismo es incumplido por las empresas mineras. A consecuencia de aquello, los impactos que se generan principalmente son en el paisaje por procesos de exploración y explotación minera; así también se producen impactos en los recursos agua y suelo, que quedan expuestos a la contaminación por incorporación de metales pesados (FMAM, 2020).

Por otra parte, según Salas (2017) desde la antigüedad vienen existiendo dos métodos de extracción de minerales en el país, uno que es la minería subterránea que es aquella que se realiza en el subsuelo por medio de túneles o cruceros verticales u horizontales, y el otro la minería a cielo abierto, en la cual se remueve material pétreo por capas o terrazas en terrenos preliminarmente delimitados con la finalidad de llegar a la veta metálica. Según Avila (2015) estos métodos de minería son los desencadenantes de los impactos ambientales principalmente en el recurso hídrico, ya que afectan a la calidad de aguas superficiales y subterráneas generando drenajes ácidos de mina y lixiviados, convirtiéndose en las principales amenazas contaminantes de ríos, riachuelos y la vida acuática.

#### **4.3. Impactos ambientales del Drenaje Ácido de Mina (DAM)**

El DAM consiste en efluentes hídricos contaminados por actividades mineras, ya sean estas subterráneas y a cielo abierto, aunque estas actividades existen hace más de un siglo, el DAM empezó a ser estudiado con mayor frecuencia en las últimas dos décadas, debido a la gran contaminación que causa en el ambiente (Moodley, Sheridan, Kappelmeyer y Akcil,

2018). Morales (2016) estima que entre 64 000 a 100 000 millones de litros de agua son contaminados por el DAM cada año, esta contaminación es generada por 40 minas en Ecuador.

El principal impacto del drenaje ácido de mina sobre el agua es la contaminación por metales pesados y metaloides, ya sea por coloides en suspensión o por especies en disolución que en aguas subterráneas presentan una capacidad de adsorción elevada de contaminantes, lo que conlleva a la movilización de metales desde la fase sólida hacia el drenaje ácido de mina (Morales, 2016). El DAM genera la variación de pH, que en condiciones de acidez forman sulfatos de hierro jarosita y como resultado se obtienen aguas con pH ácido, cargadas en aniones en las que los metales pesados como Pb, Zn, Cd, entre otros se solubilizan fácilmente (Lillo, 2008). El DAM además contiene elementos como sólidos en suspensión con grandes contenidos de sulfatos, por esta razón las elevadas concentraciones de estos elementos son perjudiciales para la actividad biológica y pueden llegar a ocasionar daños en las estructuras construidas por el hombre (Aduvire, 2006).

El drenaje ácido de mina se genera por la exposición de sulfuros y minerales al agua, al oxígeno y a las bacterias oxidantes, en particular a las acidófilas como la *acidithiobacillus*, por esta razón, dichas bacterias representan un papel muy importante en la exposición del DAM, ya que sirven de catalizadores para aumentar la tasa de oxidación de la pirita, de modo que, una vez que el mineral está expuesto, el sulfato y los metales pesados como hierro, cobre, plomo, níquel, manganeso, cadmio, aluminio y zinc se liberan en el agua (Moodley et al., 2018). En consecuencia, el factor más importante para la generación de drenaje ácido de mina es el agua que se produce dentro y alrededor de las áreas mineras, incluyendo minas abandonadas y activas, las cuales pueden ser subterráneas y a cielo abierto (Dutta et al., 2017). Por lo tanto, el drenaje ácido de mina presentará por lo general pH bajo, elevadas concentraciones de metales pesados e iones inorgánicos tóxicos, que generarán impactos ambientales (Nieves y Solano, 2017).

En minería subterránea el pH es el factor determinante de la solubilidad de metales, es por ello que el aluminio precipita en aguas con pH de 5,5 mientras que se vuelve soluble a pH superior a 8,5. Por otro lado, el hierro ferroso se transforma en hidróxido ferroso a pH superior a 8,5 (Banks et al., 1997). Otro factor fundamental es la acidez, que es el parámetro de estabilización de alcalinidad, es decir la cantidad de especies ácidas que se encuentran en una solución. El drenaje ácido de mina por lo general presenta bajo contenido de acidez orgánica,

ya que este proviene de un conjunto de protones libres, acidez mineral y disolución de Fe, Mn y Al, considerándose a estos metales ácidos debido a que sufren reacciones de hidrólisis generando iones  $H^+$  (Hedin, Nairn, et al., 1994).

Por otro lado, el drenaje ácido de mina genera pérdida de las propiedades químicas del suelo (pH, capacidad de intercambio catiónico y porcentaje de saturación de bases), además produce inestabilidad estructural con posible erosión (RoyChowdhury et al., 2015). Esta contaminación del suelo se origina a consecuencia de incorporar metales pesados en su estructura, generando oxidación de sulfuros y adición de sales; por tal motivo, la mayoría de los suelos de cultivo cercanos a las fuentes de drenaje ácido de mina se encuentran contaminados, acarreando consigo el potencial riesgo de contaminación de alimentos por bacterias y metales, produciendo enfermedades estomacales y del sistema nervioso en seres humanos y animales (Rezaie y Anderson, 2020b).

Al ser un contaminante multifactor, el DAM afecta el medio ambiente físico, químico, biológico y ecológico. Puesto que, las cadenas alimenticias y los ecosistemas colapsan a tasas mucho más altas y el resultado final es la destrucción irreversible de hábitats y la muerte de organismos tanto en ambientes terrestres como acuáticos (Moodley et al., 2018). Por esta razón, el vertido del drenaje ácido de mina sin ningún tratamiento presenta un impacto negativo para los recursos suelo y agua, ya que modifica el equilibrio de los organismos y ecosistemas circundantes, puesto que se considera al drenaje ácido de mina una amenaza ambiental crítica (Rezaie y Anderson, 2020b).

#### **4.4. Clasificación de los sistemas de tratamiento para Drenaje Ácido de Mina (DAM)**

Para evitar la contaminación ambiental por parte del drenaje ácido de mina, se han desarrollado varios tratamientos que tienen como finalidad la disminución de la acidez, la precipitación de los metales pesados y la eliminación de sustancias contaminantes como los sólidos en suspensión (Aduvire, 2006). Zevallos (2016) clasifica a los tratamientos de DAM en activos y pasivos, entre los cuales existen dos diferencias fundamentales, la primera es el abastecimiento de energía y la segunda es el costo de tratamiento, que conllevan implicaciones económicas y suministros en muchas ocasiones innecesarios. Por otro lado, Aduvire (1991) menciona que la clasificación de tratamientos para el control de DAM se da de acuerdo al origen del mismo (actividad subterránea o superficial). Es así, que para tratar el DAM superficial se construyen cunetas, diques y pequeños embalses en los fondos de las

explotaciones, mientras que para tratar el DAM subterráneo se construyen muros de intercepción, pozos, galerías, entre otros. Para mantener estas construcciones es recomendable que se realicen monitoreos periódicos para garantizar su funcionamiento. Sin embargo, Martínez et al. (2019) consideran que para la elección de un sistema para el tratamiento del drenaje ácido de mina se deben tomar en cuenta requerimientos técnicos como el tiempo de residencia, que es el periodo en el que el drenaje ácido de mina permanecerá dentro del dren anóxico calizo en contacto con los materiales reactivos, además de los acondicionamientos necesarios para el buen funcionamiento de la técnica implementada, mientras que por otro lado se debe tomar en cuenta los requerimientos económicos como los costos de los sistemas experimentales, teniendo como el desempeño ambiental como una consideración secundaria.

#### ***4.4.1. Tratamiento activo del Drenaje Ácido de Mina (DAM).***

El tratamiento activo consiste en un sistema de intercepción de DAM donde se regula el pH del agua por medio de reactivos como cal, óxido de calcio, hidróxido de sodio, entre otros (Zevallos, 2016). Según Chaparro (2015) los tratamientos activos requieren mayor trabajo que los pasivos, ya que necesitan supervisión constante del sistema, electricidad continua, insumos químicos, remoción de subproductos y almacenamiento adecuado de lodos con carga metálica, además este tipo de tratamientos conlleva un costo elevado más aún si el tratamiento está destinado a tratar grandes volúmenes de drenaje ácido de mina. Lazo (2020) considera como tratamientos activos a la aireación del DAM que es un proceso que combina una bomba de chorro y un mezclador estático, donde el principal objetivo es que el oxígeno atmosférico se incorpore al agua mediante turbinas de agitación y se produzca la oxidación de metales como el hierro ferroso y el manganeso. Posterior a la aireación se recurre a la neutralización con cal, donde se adiciona lechada de limos de cal a un tanque lleno de drenaje ácido de mina y lodo reciclado para aumentar el pH a 9, el proceso de neutralización tiene como propósito ajustar el pH del agua mediante la adición de una base dependiendo del pH objetivo. Una vez finalizada la neutralización se aplica ósmosis inversa que se da cuando se presentan dos soluciones con distintas concentraciones, pero con diferentes disolventes que se encuentran separadas por una membrana semipermeable, donde el disolvente fluye de la solución más diluida a la más concentrada hasta que las soluciones alcancen la misma concentración, como se presenta en la Figura 1.

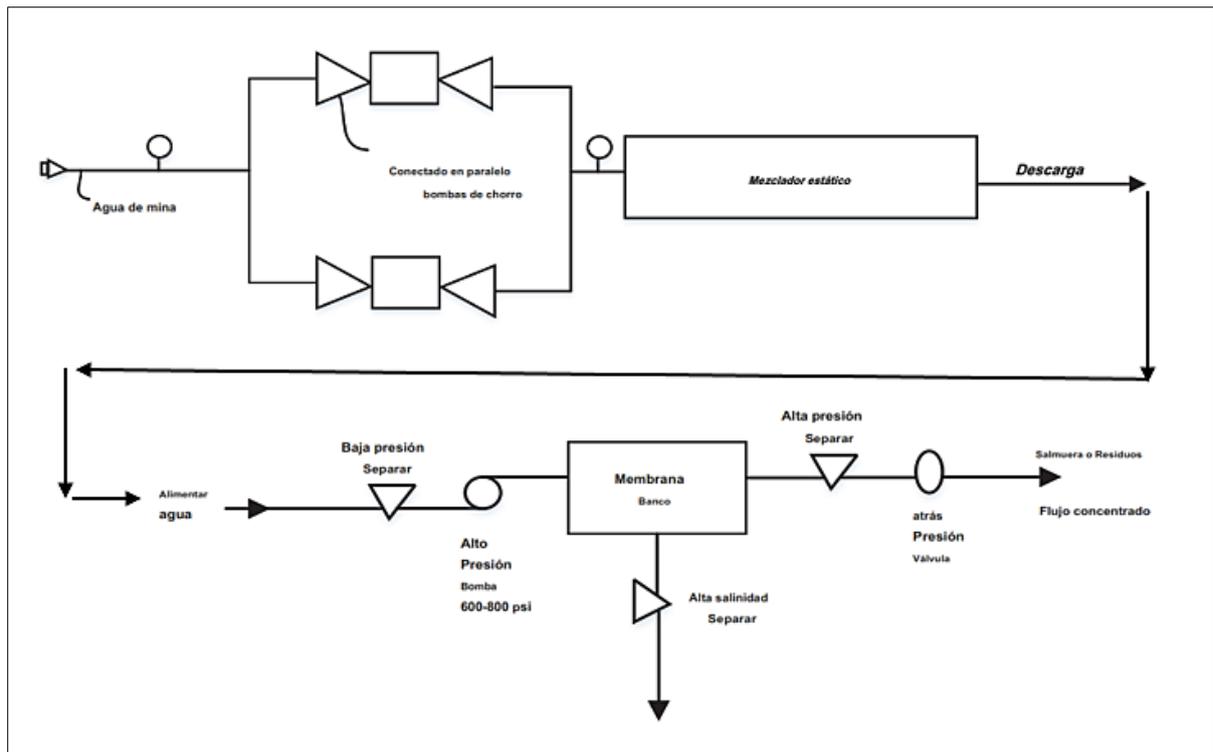


Figura 1. diagrama gráfico de un sistema activo combinado, para el tratamiento del drenaje ácido de mina.

Fuente: Lazo, 2020

Otro tratamiento activo para la eliminación de metales pesados del drenaje ácido de mina es el intercambio de iones, que consiste en aplicar una resina de intercambio catiónico que elimina metales, sulfatos y cloruros, complementariamente a este tratamiento se puede utilizar electrodiálisis que permite la separación de las localizaciones y las uniones metálicas, eliminando metales y remediando el agua (Moodley et al., 2018).

#### 4.4.2. *Tratamiento pasivo del Drenaje ácido de mina (DAM).*

Este tratamiento tiene como finalidad mejorar la calidad del DAM, acelerando los procesos de formación de precipitados; para ello se utiliza material alcalino que favorece la formación de especies insolubles que precipitan como oxihidróxidos metálicos (Zipper et al., 2014). Este tipo de tratamiento constituye una gran alternativa para recuperar agua contaminada por actividades mineras, debido a su bajo costo y bajo mantenimiento con respecto a los tratamientos activos (Kaur et al., 2018).

Los tratamientos pasivos se proyectan como una de las técnicas más atractivas para las empresas mineras, especialmente en fase de abandono, ya que requieren una mínima intervención humana y no demanda electricidad ni reactivos químicos (Chaparro, 2015). Bajo

este contexto, se consideran tratamientos pasivos a los humedales, barreras reactivas permeables, canales abiertos y canales cerrados de caliza, que tienen como principal objetivo elevar el pH del DAM a neutro y conseguir la precipitación de metales que se produce por oxidación a oxihidróxidos metálicos, donde se pueden recuperar carbonatos y sulfuros. En Europa estas técnicas pasivas para tratar el DAM constituyen alternativas válidas para la reducción de la contaminación del recurso hídrico ocasionada por la minería (Utami, Susanto y Cahyono, 2020).

Uno de los tratamientos pasivos más efectivos para neutralizar el DAM son los drenes anóxicos calizos, que consisten en zanjas rellenas con roca caliza u otro material calcáreo revestidas por una capa de arcilla y una geomembrana impermeable que conservan condiciones anóxicas, de modo que se incrementa la presión parcial del CO<sub>2</sub> y se maximiza la disolución de la caliza (Aduvire, 1991). Sin embargo, al momento de construir un dren anóxico calizo se debe considerar que estas estructuras están diseñadas para efluentes con bajo caudal y bajas concentraciones de hierro y aluminio, ya que si se presentan altas concentraciones de estos metales se producirá la precipitación de los mismos y el recubrimiento de la piedra caliza, disminuyendo la capacidad de neutralización (Chaparro, 2015).

#### **4.5. Normativa legal respecto al DAM en Ecuador.**

En Ecuador existe el Plan Nacional de Desarrollo Minero 2020 – 2030, que aporta al cumplimiento de objetivos nacionales como globales y constituye la visión estratégica para el desarrollo del sector minero mediante la implementación de una gestión armónica, eficiente, transparente y sostenible basada en la investigación y desarrollo (MERNNR, 2020). En este plan se enmarcan resoluciones para la protección ambiental del recurso hídrico, requiriendo la restauración de áreas mineras, y que se prevea y controle la formación del drenaje ácido de mina (DAM). Para subsanar la contaminación de la minería artesanal y pequeña minería se han planteado tratamientos de pasivos ambientales del DAM. Finalmente, el Reglamento del régimen especial de pequeña minería considera que el DAM es la acidificación del agua por contacto de la misma con minerales sulfurosos, que produce la contaminación hídrica.

##### ***4.5.1. Reglamento de actividades mineras***

La reforma del Reglamento Ambiental de Actividades Mineras del 2018 disponen de tres artículos para la predicción, control y mitigación del drenaje ácido de mina (MAE, 2018).

**Art. 93.-** Toda actividad minera deberá contar con un sistema de drenaje apropiado, realizándose mediciones de parámetros de manera periódica, con la finalidad de mantener un registro de la calidad del agua.

**Art. 117.-** Predicción de drenaje ácido. El titular minero, en su estudio de factibilidad identificará la presencia de sulfuros metálicos en sus residuos, estériles o relaves, por lo que deberá presentar en su estudio de impacto ambiental un programa de predicción, prevención y manejo de residuos mineros sólidos y DAM. De ser el caso que los residuos mineros sean generadores de drenajes ácidos, el plan de manejo ambiental contempla las medidas de control y monitoreo permanentes, así como las medidas de post cierre.

**Art. 125.-** Las actividades de cierre deberán incluir medidas destinadas a alcanzar la protección de los recursos hídricos, para que, de esta manera, sean objeto de aprobación, se consideran actividades referentes a) instalaciones de almacenamiento de sustancias y materiales peligrosos; b) control y mitigación de drenaje ácido de mina y c) la rehabilitación de escombreras y relaveras.

#### ***4.5.2. Límites máximos permisibles de contaminantes para descarga de efluentes***

En la norma Ecuatoriana de Calidad Ambiental del Libro VI del Anexo I del Texto Unificado de la Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente (TULSMA) se presentan los límites máximos permisibles (LMP) para descargas de efluentes a cuerpos de agua dulce (TULSMA, 2017) (Anexo 1). En la Tabla 1 se presentan los parámetros sujetos a análisis de los drenajes ácidos de mina (DAM) de los cuales para la presente investigación se consideraron los siguientes: pH, temperatura, hierro total, cobre y plomo.

Tabla 1. Límites máximos permisibles para descargas de efluentes a cuerpos de agua dulce aplicados para drenajes ácidos de mina (DAM).

<b>Parámetros</b>	<b>Unidad</b>	<b>Límite máximo permisible</b>
Aluminio	mg/l	5,0
Bario	mg/l	2,0
Cadmio	mg/l	0,02
Cianuro total	mg/l	0,1
<b>Cobre</b>	<b>mg/l</b>	<b>1,0</b>
Color real	mg/l	Inapreciable en dilución 1/20
Cromo hexavalente	mg/l	0,5
<b>Hierro total</b>	<b>mg/l</b>	<b>10,0</b>
Manganeso total	mg/l	2,0
Mercurio total	mg/l	0,005
Níquel	mg/l	2,0
Nitratos + nitritos	mg/l	10,0
Plata	mg/l	0,1
<b>Plomo</b>	<b>mg/l</b>	<b>0,2</b>
<b>pH</b>	<b>-</b>	<b>5-9</b>
Selenio	mg/l	0,1
Sulfatos	mg/l	1000
<b>Temperatura</b>	<b>mg/l</b>	<b>&lt; 35</b>

Fuente: TULSMA, 2017

## 5. Metodología

### 5.1. Área de estudio

La mina La Veinticuatro se encuentra ubicada en la Provincia de El Oro a una distancia de 2,00 km del centro del cantón Portovelo, a una altitud de 923 m.s.n.m; presenta un área total de 2,00 ha, con Coordenadas UTM:  $-3.705727^{\circ}$  S,  $-79.610981^{\circ}$ E (Figura 2). Limita al norte con el cantón Zaruma, al sur con el cantón Portovelo, al este con la parroquia Guizhaguiña y al oeste con la parroquia San Roque, posee una temperatura cálida húmeda ( $5^{\circ}\text{C}$  a  $15^{\circ}\text{C}$  en zonas altas, y  $21^{\circ}\text{C}$  a  $28^{\circ}\text{C}$  en zonas bajas), la humedad relativa oscila entre el 40% al 50% (GAD Portovelo, 2015).

El cruce Nro. 4 de la mina La Veinticuatro fue abandonado desde hace el año 2017 y se encuentra ubicado subterráneamente desde la bocamina a una distancia de 50 metros en descenso vertical y al finalizar el descenso a una distancia de 500 metros en horizontal, por tal motivo se genera drenaje ácido de mina (DAM) con pH menor a 3 producto de la oxidación de sulfuros metálicos al agua, aire y bacterias como *Thiobacillus ferrooxidans* y *Thiobacillus thiooxidans* (Rezaie y Anderson, 2020a).

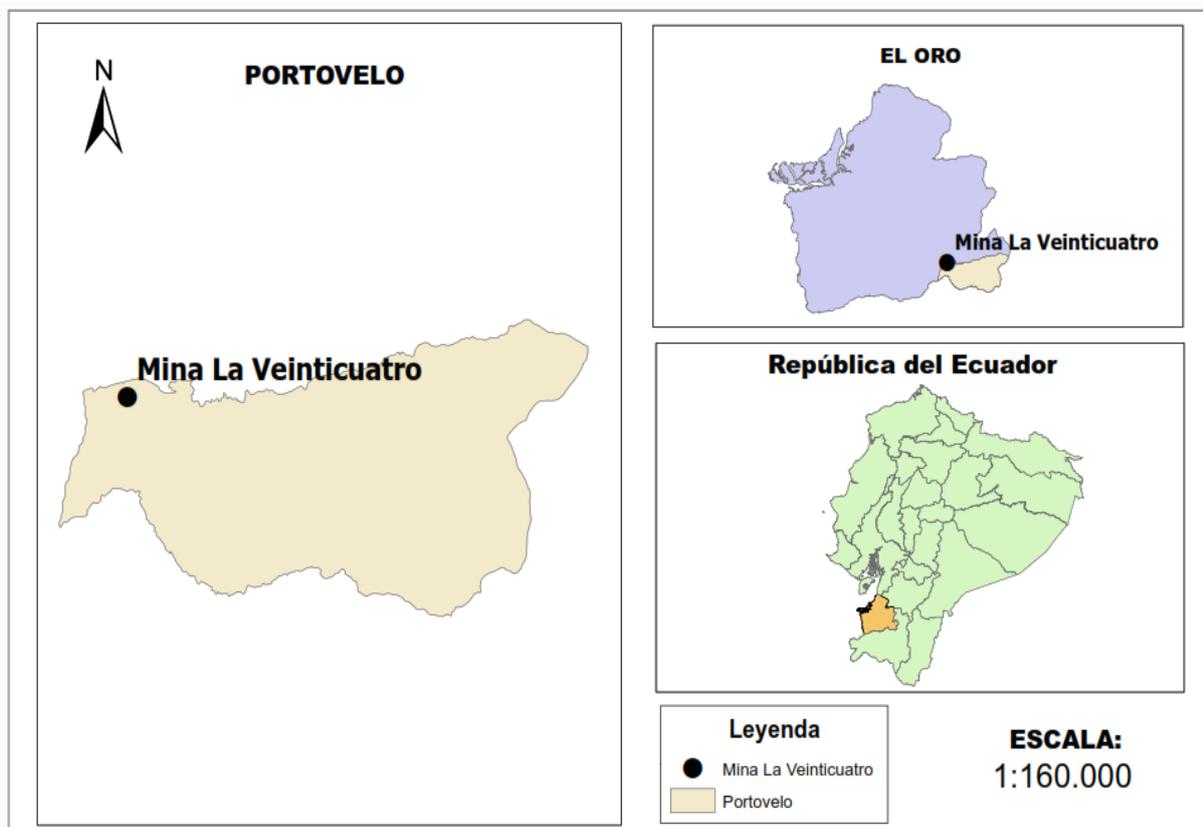


Figura 2. Ubicación de la mina La Veinticuatro, cantón Portovelo.

## 5.2. Construcción de un prototipo experimental del dren anóxico calizo

Para llevar a cabo el diseño y construcción del prototipo experimental del dren anóxico calizo se determinó previamente el caudal del DAM en campo aplicando el método volumétrico, siguiendo el protocolo de Villada (2014). Para lo cual, se utilizó un recipiente de 5 L de capacidad, el mismo se ubicó bajo la corriente captando el flujo e inmediatamente se activó el cronómetro y se detuvo al momento en que se llenó el recipiente como se presenta en la Figura 3.



Figura 3. Determinación del caudal del DAM en campo.

Luego se calculó el promedio de todas las repeticiones y se determinó el caudal en campo como lo propone Barreto (2017) en la Ecuación 1. Finalmente, se determinó el caudal experimental a partir del caudal obtenido en campo, al convertir sus unidades de  $L \text{ min}^{-1}$  a  $mL \text{ min}^{-1}$  (Nuttall, 2000).

$$[Q = V/T] \quad [Ec.1]$$

Donde,

**Q** = Caudal en litros por segundo.

**V** = Volumen en litros.

**T** = Tiempo en segundos.

A partir del caudal experimental se calcularon las dimensiones del prototipo del dren anóxico calizo por medio de relaciones caudal-ancho, caudal-largo y caudal-profundidad de acuerdo con las dimensiones establecidas por López (2016) como se presenta en la Figura 4. El prototipo experimental se diseñó en el software SOLIDWORKS (versión 2015), para obtener una representación gráfica del mismo.

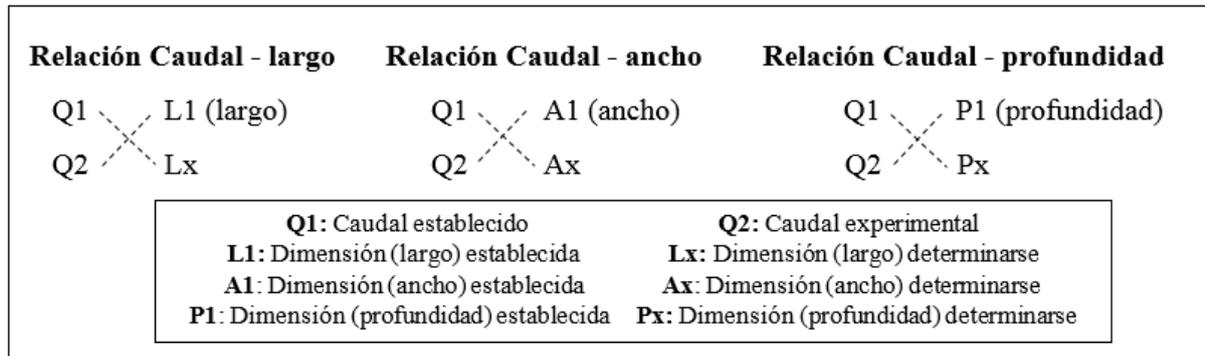


Figura 4. Relaciones para el dimensionamiento del prototipo experimental.

A partir del diseño del prototipo experimental, se construyó el mismo usando vidrio de 6 líneas de grosor para las paredes con el fin de asegurar la resistencia al colocar la roca caliza y el drenaje ácido de mina en su interior. Para esto se recortaron 6 rectángulos con las dimensiones calculadas y establecidas para el prototipo, posteriormente se pegaron los rectángulos con adhesivo de silicona, finalmente se realizaron 2 orificios de 3/8” (0,95 cm) en el rectángulo principal a 10 cm de alto y un orificio en el rectángulo final a 2 cm de la base. Posteriormente se acondicionó el prototipo experimental para su funcionamiento, mediante la fijación de mangueras flexibles transparentes de 50 cm de longitud, una manguera de 3/8” que conectó el recipiente contenedor del DAM sin tratar al punto de ingreso del prototipo por donde fluyó el DAM, mientras que en el orificio de salida del prototipo se colocó una llave plástica de 3/8” que permitió la salida del DAM tratado como se presenta en la Figura 5 (Hedin, Nairn y Kleinmann, 1994).



Figura 5. Registro fotográfico de la construcción del dren anóxico calizo experimental.

### 5.3. Implementación del dren anóxico calizo a escala experimental

#### 5.3.1. Caracterización del Drenaje Ácido de mina (DAM)

Para esta actividad se determinaron los parámetros fisicoquímicos del drenaje ácido de mina como el pH, conductividad eléctrica, turbidez, temperatura, acidez, alcalinidad y presencia de metales (Cu, Fe y Pb). Se recolectó el drenaje ácido de mina del efluente proveniente de labores mineras subterráneas del cruceo Nro. 4 de la mina La Veinticuatro del cantón Portovelo. Inicialmente se tomaron 12 muestras *in situ* del drenaje ácido de mina para su caracterización,

La toma de muestras del drenaje ácido de mina se realizó de acuerdo con el protocolo de muestreo recomendado por Moreno y Palacios (2017) en el cual se realizaron las siguientes actividades: inicialmente los recipientes de vidrio (150 mL) a utilizarse fueron esterilizados en el laboratorio y etiquetados como se muestra en la Figura 6, posteriormente estos recipientes fueron homogenizados tres veces con el DAM, para ello se sumergió cada recipiente y se lo llenó evitando el ingreso de rocas que puedan interferir en los resultados, durante el llenado se ubicó el recipiente en sentido contrario de la corriente y una vez lleno hasta su totalidad se tapó inmediatamente impidiendo que ingrese el aire en su interior como se presenta en la Figura 7.

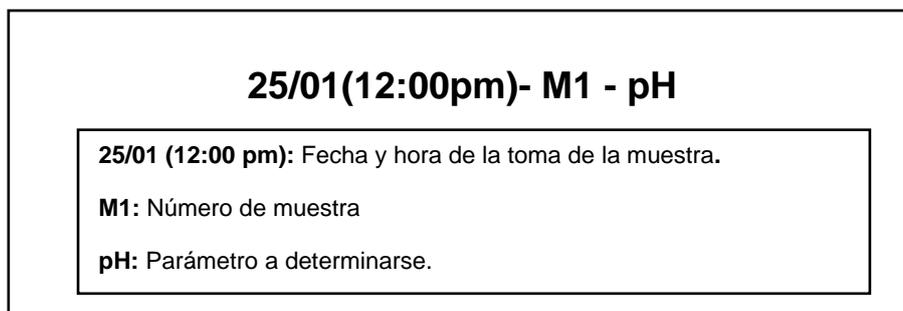


Figura 6. Etiqueta para recipientes muestrales de DAM.



Figura 7. Registro fotográfico del muestreo y toma de datos in situ del DAM de la mina La Veinticuatro.

Todas las muestras se conservaron en refrigeración a 5 °C hasta su análisis, considerando los tiempos de conservación de las muestras de acuerdo a los parámetros a analizarse como acidez o alcalinidad (24 h), cobre, hierro y plomo (1 mes), pH (6 horas), turbidez (24 horas) como lo indica la Norma Técnica Ecuatoriana 2169:2013 (INEN, 2013). Posteriormente, las muestras fueron transportadas durante tres horas hasta la realización de los análisis en el Laboratorio de Suelos y Bromatología de la Universidad Nacional de Loja, donde se determinaron los parámetros de: pH, conductividad eléctrica, acidez y turbidez.

La determinación del pH y la conductividad eléctrica se realizó mediante un multiparámetro HACH SENSION 156, el cual fue calibrado de acuerdo a la metodología presentada en el manual de HACH COMPANY (2001), para la correcta calibración primero se llenaron 2/3 de un vaso de calibración de 10 mL con solución buffer de pH 4, posteriormente se enroscó el vaso de calibración hasta el cuerpo del electrodo del equipo y se seleccionó calibración rápida en donde se confirmó el parámetro a calibrarse (pH), finalmente se obtuvo la confirmación y el equipo fue calibrado correctamente. El mismo procedimiento se realizó

para las soluciones de pH (6,86 y 9,18) y también para la calibración de conductividad eléctrica de soluciones buffer (1413 uS/cm y 12880 uS/cm), una vez calibrado el equipo se procedió a analizar cada muestra de drenaje ácido de mina, para ello se lavaron los electrodos de pH y conductividad eléctrica con agua destilada con el fin de evitar la contaminación de la muestra, luego se trasvasó 50 ml de cada muestra de drenaje ácido de mina en vasos de precipitación de 100 mL, finalmente se introdujo el electrodo en la muestra de drenaje ácido de mina y se realizó la medición hasta que el valor mostrado en el equipo se estabilizó.

Para la determinación de turbidez se utilizó un turbidímetro HACH – Modelo 2100 AN, antes de su uso se corroboró que el equipo se encontraba calibrado. Posteriormente, para la medición de la turbidez se trasvasó cada muestra de DAM en cubetas de vidrio de 10 mL hasta la línea de aforo, finalmente se colocaron cada una de las cubetas en el turbidímetro para la respectiva determinación de la turbidez.

El análisis de la acidez se realizó mediante titulación ácido-base con Na(OH), para lo cual inicialmente se preparó en un matraz aforado una solución de 0,02 N (normal) con 10 mL de Na(OH) y agua destilada hasta el respectivo aforo de 500 mL, seguidamente se agitó dicha solución y se colocó en una bureta graduada de 50 mL, esta bureta se sujetó a una pinza con soporte, luego se colocaron 50 mL de cada muestra de DAM, 3 gotas de fenolftaleína y un imán agitador en matraces Erlenmeyer de 250 mL, posteriormente se tituló la muestra hasta conseguir un viraje rosado persistente a pH 3,7. Para la determinación de alcalinidad se siguió el mismo procedimiento de la acidez, con las diferencias de que la solución inicial se realizó con H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> y el indicador del viraje fue el anaranjado de metilo hasta conseguir un color amarillo anaranjado a un pH de 4,3 como se presenta en la Figura 8, para dichos análisis se utilizaron los métodos indicados por Nairn et al. (1991).

Para la determinación de la concentración de metales, las muestras de DAM fueron acidificadas con HNO<sub>3</sub> a pH 2 (Utami et al., 2020) y posteriormente enviadas al laboratorio DEMEX-EPN para su respectivo análisis en un espectrómetro de absorción atómica (PERKIN ELMER – Annalist 300).



Figura 8. Registro fotográfico del análisis de acidez y alcalinidad realizados en laboratorio.

### 5.3.2. Fase experimental

Para el tratamiento pasivo del DAM se realizaron 4 repeticiones del experimento, con la finalidad de conocer el comportamiento de los parámetros fisicoquímicos del DAM. Por cada repetición se utilizaron 3,60 kg de roca caliza, es decir la cantidad caliza necesaria a utilizarse en un prototipo experimental viene dada por la relación 2:1 (por cada 2 mL de DAM se ocupó 1 gramo de caliza). La caliza fue adquirida a la empresa Calizas Chimborazo, con una composición de 82,44 % de  $\text{CaCO}_3$  y 0,26 % de  $\text{Ca(OH)}_2$ , de modo que a mayor  $\text{CaCO}_3$  presente en la caliza mayor será la pureza de la misma, lo que permitirá un ligero aumento en el pH del DAM. La altura de cama de la roca caliza en el prototipo experimental del dren anóxico calizo fue de 8 cm que representó la altura alcanzada por el total de roca caliza colocada (3,6 kg), mientras que los tiempos de medición de cada variable del DAM ocupados en este estudio fueron adaptados a partir de los tiempos en diversas horas (1, 24, 48, 72, 96, 120, 144, 168, 192, 216, 240 y 256 horas) utilizados en el estudio de Rivera et al. (2020).

Para el experimento se ocuparon ocho muestras simples de DAM obtenidas previamente en un mismo punto del efluente y a la misma hora, dichas muestras fueron recolectadas y almacenadas en contenedores de 8 L de capacidad a temperatura ambiente (18 °C) hasta su uso de acuerdo con el protocolo de muestreo utilizado anteriormente en la caracterización del DAM recomendado por Moreno y Palacios (2017). Del total de contenedores, cuatro ( $n=4$ ) de ellos fueron asignados al azar al grupo experimental (contenedores 7,8,4,6) que se sometió al tratamiento pasivo del dren anóxico calizo y los cuatro

(n=4) contenedores restantes fueron asignados al grupo de control (contenedores 5,2,3,1) que no fueron sometidos al tratamiento pasivo del dren anóxico calizo.

El experimento consistió en un diseño completamente al azar (DCA) donde las repeticiones experimentales se realizaron en orden aleatorio. Este diseño constó de dos grupos uno de control y otro experimental que se los denominó drenaje sin tratar (DST) y drenaje tratado (DT) respectivamente. El DT se sometió al tratamiento pasivo del dren anóxico calizo con el fin de estabilizar el pH, reducir la conductividad eléctrica y la acidez, aumentar la alcalinidad y determinar la presencia de Cu, Fe y Pb. Mientras que el DST no se sometió al tratamiento pasivo del dren anóxico calizo. Se realizaron mediciones de parámetros de pH, conductividad eléctrica, acidez, y turbidez a los dos grupos (control y experimental).

Para cada repetición del tratamiento (n=4), se vertió 7,2 L de drenaje ácido de mina de cada contenedor del grupo experimental en el prototipo del dren anóxico calizo; el DAM fue colocado por medio de una manguera conectada a una válvula reguladora de caudal, la misma que controló un caudal de  $5 \text{ mL min}^{-1}$  de DAM, para garantizar un caudal constante previo al inicio del experimento se realizaron cinco pruebas de control de caudal con un recipiente de volumen de 5 mL y un tiempo de 1 min. Una vez que se descargó la totalidad del DT, este permaneció dentro del dren por un tiempo de retención hidráulico de 24 horas; transcurrido ese tiempo, el DT se depositó en un contenedor abierto hasta cumplir las 240 horas para simular su almacenamiento como en una piscina de precipitación de metales. Por otra parte, el grupo control (n=4) consistió en no someter el DAM al prototipo del dren anóxico calizo; sin embargo, este permaneció en contenedores cerrados las primeras 24 horas para simular las condiciones anóxicas, luego se mantuvieron abiertos hasta cumplir las 240 horas al igual que el DT (Anexo 2).

Se determinó el pH, la conductividad eléctrica y la temperatura tanto para el DST como para el DT con un multiparámetro portátil WATERPROOF (Modelo: pH/Ec-983) en los tiempos de 0, 24, 48, 72, 96, 120, 144, 168, 192, 216 y 240 horas; el multiparámetro portátil fue calibrado antes de cada uso con tres soluciones estándar de pH (4,00, 6,86 y 9,18 a  $25^{\circ}\text{C}$ ) y dos soluciones estándar de conductividad eléctrica (1413  $\mu\text{S/cm}$  y 12880  $\mu\text{S/cm}$  a  $25^{\circ}\text{C}$ ).

Además, se tomaron muestras del DT al tiempo de 24, 48, 72 y 96 horas para los análisis que se realizaron en el laboratorio de pH, conductividad eléctrica y alcalinidad. Así mismo se tomaron muestras del DST, al tiempo de 24, 48, 72 y 96 horas para los análisis en el laboratorio de pH y conductividad eléctrica.

La acidez fue medida en cada una de las muestras del DST y del DT tomadas al tiempo de 0 horas, y se realizaron con la metodología indicada anteriormente en la caracterización del DAM (sección 3.3.1).

La determinación de la presencia de Cu, Fe y Pb se realizó únicamente en el DT a las 24 horas, el análisis realizado en este único tiempo se debió a que el DAM fue sometido al tratamiento pasivo del dren anóxico calizo y tuvo un tiempo de retención hidráulico de 24 horas dentro del prototipo experimental, además existió la limitante de que por fallos técnicos no se pudo utilizar el espectrofotómetro de masas del Laboratorio de Suelos y Bromatología, por esta razón no se realizaron análisis posteriores al tiempo de retención hidráulico, por lo que las muestras obtenidas de DT fueron enviadas al laboratorio de la Escuela Politécnica Nacional (EPN) de la ciudad de Quito. Para el análisis de presencia de metales las muestras de cada repetición fueron homogenizadas para obtener una muestra mixta y los metales fueron medidos por espectrometría de absorción atómica (PERKIN ELMER – Modelo Analyst 300) por el laboratorio DEMEX de la Escuela Politécnica Nacional (EPN).

#### **5.4. Planteamiento de una propuesta de tratamiento pasivo del dren anóxico calizo como alternativa de estabilización del Drenaje Ácido de Mina (DAM) en campo.**

Con los resultados obtenidos del dimensionamiento y de los análisis fisicoquímicos de la etapa experimental, se planteó una propuesta de tratamiento pasivo del dren anóxico calizo para tratar el drenaje ácido de mina del cruceo Nro. 4 de la mina La Veinticuatro. Inicialmente se realizó la revisión sistemática de literatura sobre los tratamientos pasivos utilizados para estabilizar el DAM proveniente de labores mineras subterráneas. Para esta revisión se utilizaron las bases de datos Dialnet, Redalyc, Scielo, Science Direct, SCOPUS y el buscador de Google académico. Para la estrategia de búsqueda se utilizaron palabras clave como las siguientes (drenaje ácido de mina - acid mine drainage) (drenes anóxicos calizos - anoxic limestone drains) (DAM- tratamiento pasivo) (metal removal) (sistemas pasivos -passive systems).

Posteriormente, se calculó la cantidad de caliza a utilizarse (Ecuación 2), se compensaron las pérdidas por disolución de caliza (Ecuación 3) y a partir de estos cálculos se determinó la cantidad total de caliza requerida para el tratamiento (Ecuación 4), las ecuaciones utilizadas en este apartado fueron obtenidas del estudio de Zamora y Mata (2017). Además, a partir de los resultados experimentales se obtuvo el tiempo de residencia que permanecerá el DAM en contacto con la caliza en el interior del dren hasta alcanzar la neutralización del pH.

$$[ M = (Q * \rho * tR) / Vp ] \quad [Ec. 2]$$

Donde,

M: cantidad de caliza

Q: caudal del efluente a tratar

$\rho$ : densidad de la caliza suelta (1,4 kg/L)

$t_R$ : tiempo de residencia (48 h)

$V_p$ : volumen el de poros expresado en forma decimal (0,5)

$$[ M = (Q * C * T) / X ] \quad [Ec.3]$$

Donde,

M: cantidad de caliza

Q: caudal del efluente a tratar

C: alcalinidad esperada

T: periodo de tratamiento que se pretende dar

X: contenido de carbonato cálcico de la caliza (expresado en decimal)

$$[ M = (Q * \rho * tR) / Vp + (Q * C * T) / X ] \quad [Ec. 4]$$

Donde,

M: cantidad de caliza

Q: caudal del efluente a tratar

$\rho$ : densidad de la caliza suelta (1,4 kg/L)

$t_R$ : tiempo de residencia (48 h)

$V_p$ : volumen el de poros expresado en forma decimal (0,5)

C: alcalinidad esperada

T: periodo de tratamiento que se pretende dar

X: contenido de carbonato cálcico de la caliza (expresado en decimal).

Por otro lado, se procedió a dimensionar el dren anóxico calizo (largo, ancho y profundidad) a partir del dimensionamiento realizado por Robert Hedin (Hedin, Watzlaf, et al., (1994) de acuerdo a las relaciones mostradas anteriormente en la construcción del prototipo

experimental (apartado 3.2). Se consideraron factores como el caudal de salida de la bomba de impulsión que transportará el DAM desde el crucero Nro. 4 hasta el dren anóxico calizo y el porcentaje de  $\text{CaCO}_3$  de la roca caliza. Una vez dimensionado el dren anóxico calizo que puede ser implementado en campo, se determinaron las cantidades de los materiales complementarios (suelo arcilloso y material geotextil) que tendrán la finalidad de evitar el ingreso de oxígeno al interior del dren anóxico calizo. La cantidad de cada material complementario se obtuvo a través de relaciones de volumen de terreno a ocupar y las dimensiones de largo, ancho y profundidad (Hedin, Watzlaf, et al., 1994).

Seguidamente, se planteó un tratamiento pasivo complementario (piscina de precipitación de metales) de acuerdo a la revisión sistemática realizada y a los resultados obtenidos en la matriz de selección de tratamientos complementarios para drenes anóxicos calizos. La piscina de precipitación de metales tendrá como finalidad la oxidación, hidrólisis y precipitación de los oxihidróxidos metálicos, de modo que se obtengan parámetros dentro de los límites máximos permisibles de vertido a cuerpos de agua dulce. Finalmente, se propusieron acondicionamientos complementarios para mejoras del dren anóxico calizo, como los siguientes:

- Bomba de impulsión que permitirá el transporte del drenaje ácido de mina desde el crucero Nro. 4 hacia el interior del dren anóxico calizo, el empleo de la bomba se da debido a que el drenaje ácido de mina se encuentra en la zona subterránea, donde desde la bocamina se recorren 50 metros en vertical y al finalizar el descenso se recorre una distancia de 500 metros en horizontal.
- Kits de acoples que tendrán como objetivo asegurar las uniones, codos, T de apoyo que se incorporarán en el dren anóxico calizo y en el sistema conducción del drenaje ácido de mina.
- Tuberías y mangueras que transportarán el drenaje ácido de mina desde el interior de la mina hacia el dren anóxico calizo, y desde este último a la piscina de precipitación.
- Tanque plástico que permitirá la recolección del drenaje ácido de mina en el interior de la mina, desde este tanque el DAM será inducido por medio de la bomba de impulsión.

## 5.5. Análisis estadístico

Los supuestos de la normalidad y la homogeneidad de varianza de los datos obtenidos en el presente estudio (pH, conductividad eléctrica y alcalinidad) fueron analizados con la prueba de Shapiro-Wilks que consiste en plantear una hipótesis nula para conocer si una muestra proviene de una distribución normal, mientras que la prueba de Mauchly o de esfericidad consiste en validar un análisis de varianza de medidas repetidas en el tiempo. El diseño estadístico utilizado fue completamente al azar (DCA) ya que los objetos experimentales de estudio (contenedores de DAM) fueron asignados aleatoriamente, mientras que la comparación de las variables respuesta de pH y conductividad eléctrica del DST y el DT se realizó mediante una prueba t de Student para muestras independientes que tuvo como objetivo determinar si existe diferencia significativa entre las medias de dos grupos mediante pruebas de hipótesis. Además, para las mediciones de los parámetros de pH y conductividad eléctrica medidas en laboratorio del DT (0, 24, 48, 72 y 96 horas) se realizó el análisis de medidas repetidas en el tiempo que tuvo como finalidad determinar el efecto del tiempo sobre estos parámetros, se realizaron por medio de la prueba de Bonferroni, además para los parámetros (pH y conductividad eléctrica) del DT medidos en laboratorio se realizó análisis regresión, inicialmente se efectuó regresión lineal y cuadrática, sin embargo, la regresión polinomial (cúbica) fue la que mostró un mayor R ajustado, a partir de esta se obtuvo la ecuación matemática que mejor se ajustó al modelo estadístico. Todos los análisis se realizaron en el software estadístico IBM SPSS Statistics 25, donde se consideró un nivel de confianza del 95 % y un error del 5%.

## 6. Resultados

En el presente capítulo se muestran los resultados de la construcción del prototipo experimental del dren anóxico calizo. Además, se presenta la determinación de los parámetros fisicoquímicos y el análisis estadístico de los mismos. Finalmente, se muestra la propuesta de tratamiento pasivo del dren anóxico calizo para que pueda ser implementado en campo en la mina La Veinticuatro.

### 6.1. Construcción del dren anóxico calizo experimental

En la Tabla 2 se presentan el volumen y el tiempo obtenidos para la determinación del caudal en campo.

Tabla 2. Volumen y tiempo para determinación del caudal.

	<b>Volumen (L)</b>	<b>Tiempo (min)</b>
	5	1,02
	5	1,03
	5	0,96
	5	0,98
	5	1,00
<b>Total</b>	<b>25</b>	<b>4,99</b>

El caudal de campo obtenido fue de  $5 \text{ L min}^{-1}$ , y de acuerdo a la conversión de unidades resultó un caudal experimental para ser utilizado en el prototipo de  $5 \text{ mL min}^{-1}$ .

Por otro lado, el dimensionamiento del prototipo experimental del dren anóxico calizo se presenta en la Tabla 3. Dicho prototipo fue construido con vidrio, se optó por este material dado que es inerte y no genera reacciones químicas con el DAM (López, 2016). En el prototipo experimental por cada repetición se trató un volumen de DAM de 7,2 L durante 24 horas, el cual fue alimentado por un caudal de  $5 \text{ mL min}^{-1}$ .

Tabla 3. Dimensionamiento del prototipo experimental del dren anóxico calizo.

<b>Dimensión</b>	<b>Unidades</b>	<b>Valor</b>
Profundidad	cm	15
Ancho	cm	15
Largo	cm	56,25
Relación ancho – largo	–	1:3,75

Finalmente, el prototipo experimental se construyó con el procedimiento mostrado anteriormente en el apartado 3.2. En la Figura 9 se presenta el prototipo experimental del dren anóxico calizo construido y el plano gráfico del mismo (Anexo 3). Por otro lado, en la Figura 10 se presenta el prototipo experimental acondicionado y con roca caliza de 5 cm de tamaño. Una utilización de granulometría menor pudo haber llegado a disolverse con mayor rapidez y producir taponamiento del grifo de salida del drenaje ácido de mina tratado.



Figura 9. Prototipo experimental construido y acondicionado.



Figura 10. Prototipo experimental del dren anóxico calizo al inicio del tratamiento del drenaje ácido de mina.

## **6.2. Determinación del pH, conductividad eléctrica, turbidez y presencia de Fe, Cu y Pb del Drenaje ácido de Mina (DAM).**

### **6.2.1. Caracterización del DAM.**

De acuerdo al análisis estadístico de los parámetros del DAM los datos de pH fueron normales (Shapiro-Wilks,  $p > 0,05$ ) al igual que los datos de conductividad eléctrica y alcalinidad. Mientras que, los datos de acidez no fueron normales (Shapiro-Wilks,  $p < 0,05$ ) que corroboró la dispersión de los datos a través de la línea de tendencia central.

Los resultados de la caracterización del DAM del crucero Nro. 4 de la mina La Veinticuatro medidos *in situ* se presentan en la Tabla 4, donde se puede observar que ciertos parámetros del DAM (pH, conductividad eléctrica, hierro, cobre y plomo) no cumplen con los límites máximos permisibles de vertido a cuerpos de agua dulce de la normativa ecuatoriana e internacional. Los resultados de la concentración de metales del drenaje ácido de mina obtenidos en el laboratorio se presentan en el Anexo 4.

Tabla 4. Caracterización del DAM.

Parámetro	Media $\pm$ DS	Límite máximo permisible <sup>a</sup>
pH	2,71 $\pm$ 0,024	5 – 9
Conductividad eléctrica (uS/cm)	2350 $\pm$ 8,16	1000 <sup>c</sup>
Temperatura (°C)	21,41 $\pm$ 0,34	< 35
Turbidez (NTU)	0,17 $\pm$ 0,011	5 <sup>c</sup>
Acidez (mg L <sup>-1</sup> )	380,00 $\pm$ 8,08	200 – 500 <sup>c</sup>
Hierro (mg L <sup>-1</sup> )	10,78 <sup>b</sup>	10,00
Cobre (mg L <sup>-1</sup> )	4,17 <sup>b</sup>	1,00
Plomo (mg L <sup>-1</sup> )	0,15 <sup>b</sup>	0,20

a. TULSMA (2017)

b. Muestra homogénea.

c. OMS (2019), EPA (2019).

DS (desviación estándar)

A continuación, se presentan los resultados de los análisis realizados a las muestras experimentales (DST= 4) (DT= 4). Las muestras de DST presentaron una acidez promedio al tiempo de 0 horas de  $338,5 \pm 33,5$  mg L<sup>-1</sup> con un error estándar de la media de 16,7. Mientras que la acidez promedio de las muestras de DT a las 0 horas fue de  $363,2 \pm 47,5$  mg L<sup>-1</sup> con un error estándar de la media de 23,8. Donde la desviación estándar mostró la dispersión de los datos con respecto a la media de la variable acidez.

En la tabla 5 se presentan los resultados de los valores medios y la desviación estándar de las repeticiones (n=4) del pH medido en laboratorio del DST a las 0 y 24 horas, y del DT a las 0, 24, 48, 72 y 96 horas.

Tabla 5. Media y desviación estándar del pH del DAM medidos en el laboratorio.

<b>pH</b>		
<b>Tiempo (Horas)</b>	<b>Drenaje ácido de mina sin tratar (DST)</b>	<b>Drenaje ácido de mina tratado (DT)</b>
0 h	2,74 (0,046)	2,73 (0,028)
24 h	2,75 (0,033)	5,96 (0,301)
48 h	SD	6,37 (0,256)
72 h	SD	6,73 (0,332)
96 h	SD	7,00 (0,270)

SD (sin datos) parámetro no medido.

Desviación estándar entre paréntesis

Los datos de pH del DST y DT medidos en laboratorio fueron normales (Shapiro-Wilks,  $p > 0,05$ ) y la prueba T de student para muestras independientes corroboró que a las 0 horas no existieron diferencias significativas, mientras que a las 24 horas si existieron diferencias significativas entre el pH del DST y DT medidos en el laboratorio ( $t = -21,25$  y  $p = 0,0002$ ).

El análisis de medidas repetidas en el tiempo del pH del DT medido en el laboratorio ( $n=4$ ) se determinó que existen diferencias significativas entre las 0, 24 y 48 horas. Mientras que entre las 48 y 72 horas no existió diferencia significativa, como se presenta en la Figura 11 (Anexo 5). Existió la limitación con un pH medido a la hora 96, por lo que este tiempo no fue considerado para dicho análisis, ya que no cumplía con los supuestos de homogeneidad de varianzas y esfericidad asumida. Mientras que, los datos de 0, 24, 48 y 72 horas si cumplieron con dichos supuestos como se presenta en el Anexo 6 y Anexo 7.

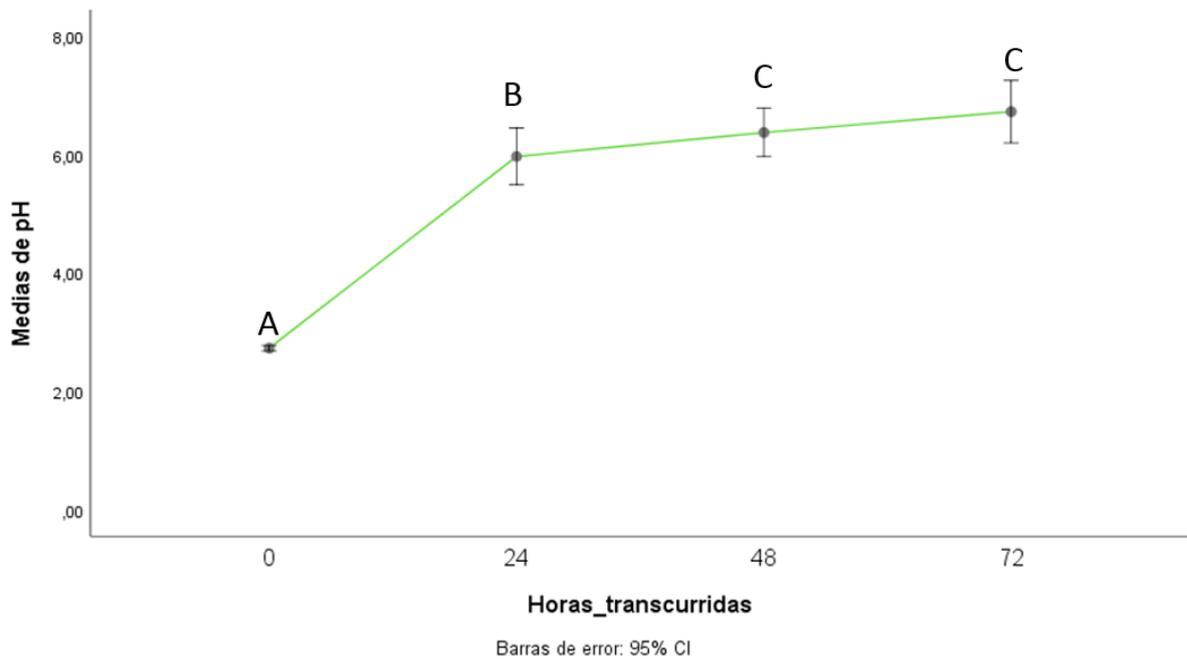


Figura 11. Medidas repetidas en el tiempo del pH del DT.

Nota: Las medias de pH que no comparten una misma letra (A, B y C) son significativamente diferentes, mientras que las medias que comparten una misma letra no presentan diferencia significativa.

El análisis de regresión polinomial (cúbica) de los datos de pH del DT medidos en laboratorio a los tiempos de 0, 24, 48, 72 y 96 horas mostró un R cuadrado ajustado del 96,26 % lo que indicó que el pH incrementó con el tiempo como se presenta en la Figura 12. La ecuación de regresión que mejor se ajustó al modelo fue:

$$Y = 2,770 + 0,1914 (X) - 0,003110 (X^2) + 0,000016 (X^3)$$

Donde,

Y: valor de pH a determinarse

X: tiempo en horas

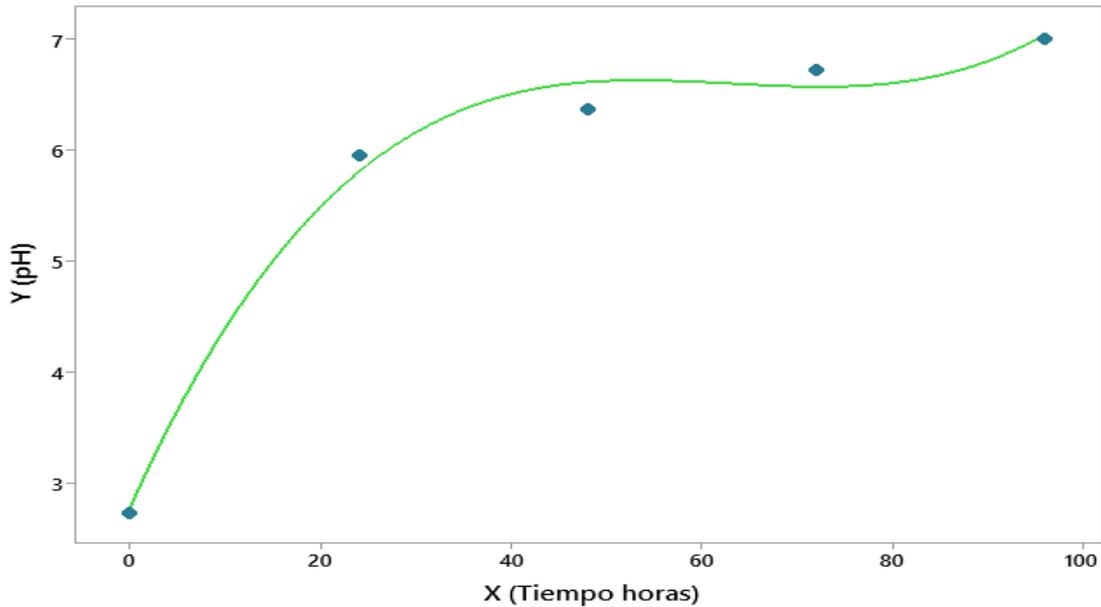


Figura 12. Gráfica de la línea ajustada a los datos de pH medidos en laboratorio.

El pH medido con el analizador portátil desde la hora 0 hasta la hora 240 del DST y DT se presentan en la Figura 13 (Anexo 8), donde se observa el aumento significativo del pH en el DT. La media y desviación estándar del pH del DST a las 0 horas fue de  $2,91 \pm 0,093$ , mientras que la media y desviación estándar del DT a las 0 horas fue de  $2,93 \pm 0,081$ , lo que indicó que el DAM es de tipo I perteneciente a muy ácido, y se encuentra por fuera del rango (5-9) de los Límites Máximos Permisibles (LMP) de la calidad Ambiental para descargas a cuerpos de agua dulce. Los valores de pH medidos con el analizador portátil fueron similares a los valores medidos en el laboratorio (Tabla 5). Gráficamente se puede observar la diferencia significativa entre el pH del DST y el DT a partir de la hora 24 a 240.

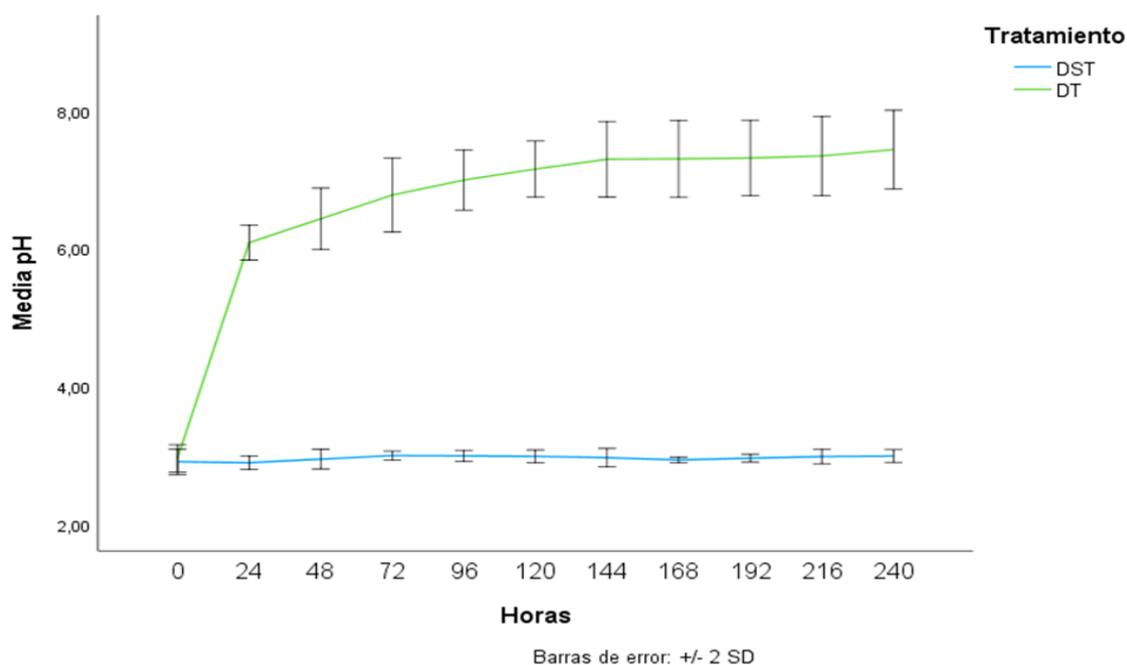


Figura 13. pH medido en horas en el DST y DT.

La Tabla 6 presenta los resultados de los valores medios y la desviación estándar de las repeticiones (n=4) de conductividad eléctrica medida en el laboratorio, donde se midió el DST a las 0 y 24 horas, y el DT a las 0, 24, 48, 72 y 96 horas.

Tabla 6. Media y desviación estándar de la conductividad eléctrica del DAM medidos en el laboratorio.

Conductividad eléctrica (uS/cm)		
Tiempo (Horas)	Drenaje ácido de mina sin tratar (DST)	Drenaje ácido de mina tratado (DT)
0 h	2476 (24,4)	2468,5 (35,5)
24 h	2464 (27,1)	2062,3 (18,3)
48 h	SD	2073,3 (16,7)
72 h	SD	2075,3 (16,0)
96 h	SD	2072,0 (22,0)

SD (sin datos) parámetro no medido.

Desviación estándar entre paréntesis

Los datos de conductividad eléctrica del DST y DT medidos en laboratorio no mostraron una distribución normal (Shapiro-Wilks,  $p < 0,05$ ) y se realizó la prueba de Man-Whitney de variables independientes que corroboró diferencias significativas únicamente para la conductividad eléctrica medida a las 24 horas entre el DST y el DT ( $W = 26$  y  $p = 0,0286$ ).

El análisis de medidas repetidas en el tiempo de la conductividad eléctrica medida en el laboratorio del DT corroboró que existe diferencia significativa entre las 0 y 24 horas. Mientras que, entre las 24, 48 y 72 horas no existió diferencia significativa como se presenta en la Figura 14 (Anexo 9). Existió una limitación a la hora 96, por lo que este tiempo no fue considerado para el análisis de medidas repetidas en el tiempo, ya que no cumplía con los supuestos de homogeneidad de varianzas y esfericidad asumida. Mientras que los datos de 0, 24, 48 y 72 horas si cumplieron con dichos supuestos (Anexo 10; Anexo 11).

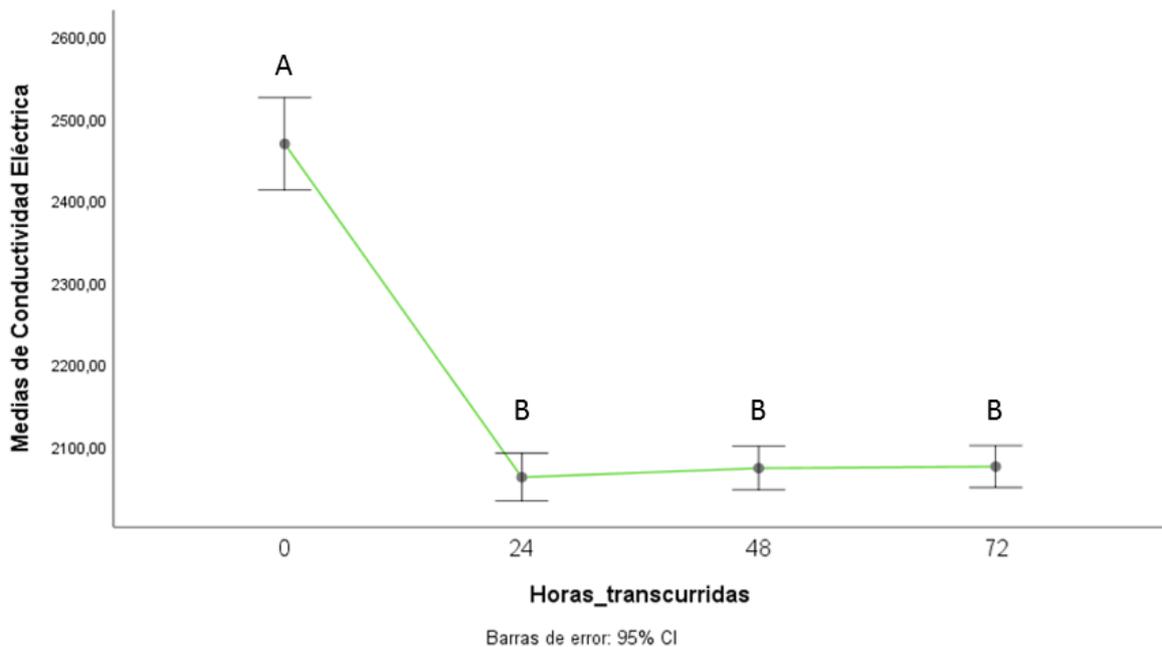


Figura 14. Medidas repetidas en el tiempo de la conductividad eléctrica del DT.

Nota: Las medias de conductividad eléctrica que no comparten una misma letra (A y B) son significativamente diferentes, mientras que las medias que comparten una misma letra no presentan diferencia significativa.

El análisis de regresión polinomial (cúbica) de los datos de conductividad eléctrica del DT medidos en laboratorio en los tiempos de 0, 24, 48, 72 y 96 horas mostró un R cuadrado ajustado del 91,7% lo que indicó que inicialmente la conductividad eléctrica descende y con el tiempo se produjo un ligero incremento, sin embargo, luego la conductividad eléctrica descendió, como se presenta en la Figura 15. La ecuación de regresión que mejor se ajustó al modelo fue:

$$Y = 2462 - 25,35 (X) + 0,4656 (X^2) + 0,002547 (X^3)$$

Donde,

Y: valor de conductividad eléctrica a determinarse.

X: tiempo en horas.

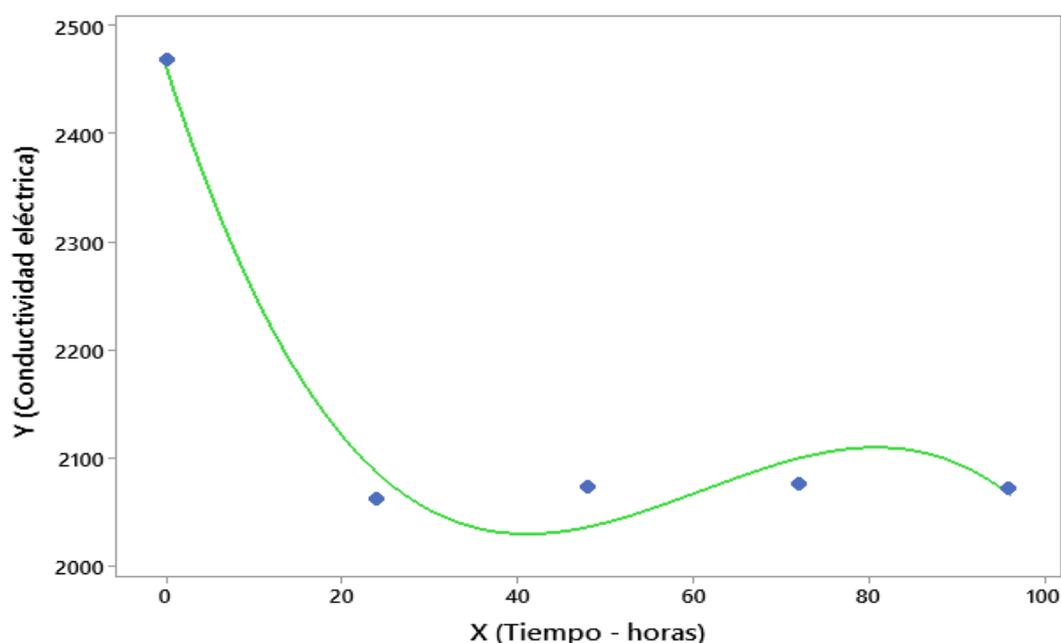


Figura 15. Gráfica de la línea ajustada a los datos de conductividad eléctrica medidos en laboratorio.

En la Figura 16 se presentan los resultados de conductividad eléctrica medidos con el analizador portátil desde las 0 hasta las 240 horas del DST y DT (Anexo 12). La conductividad eléctrica del DST a las 0 horas fue de  $2525,0 \pm 17,30$  uS/cm y del DT a las 0 horas fue de  $2571,50 \pm 20,60$  uS/cm, valores que se encuentran fuera del rango de los Límites Máximos Permisibles (LMP) de la calidad Ambiental para descargas a cuerpos de agua dulce (1000 uS/cm). Los valores de conductividad eléctrica medidos con el analizador portátil fueron similares a los valores medidos en el laboratorio (Tabla 6). Gráficamente se puede observar que a partir de la hora 24 la conductividad eléctrica del DT y DST es estadísticamente diferente.

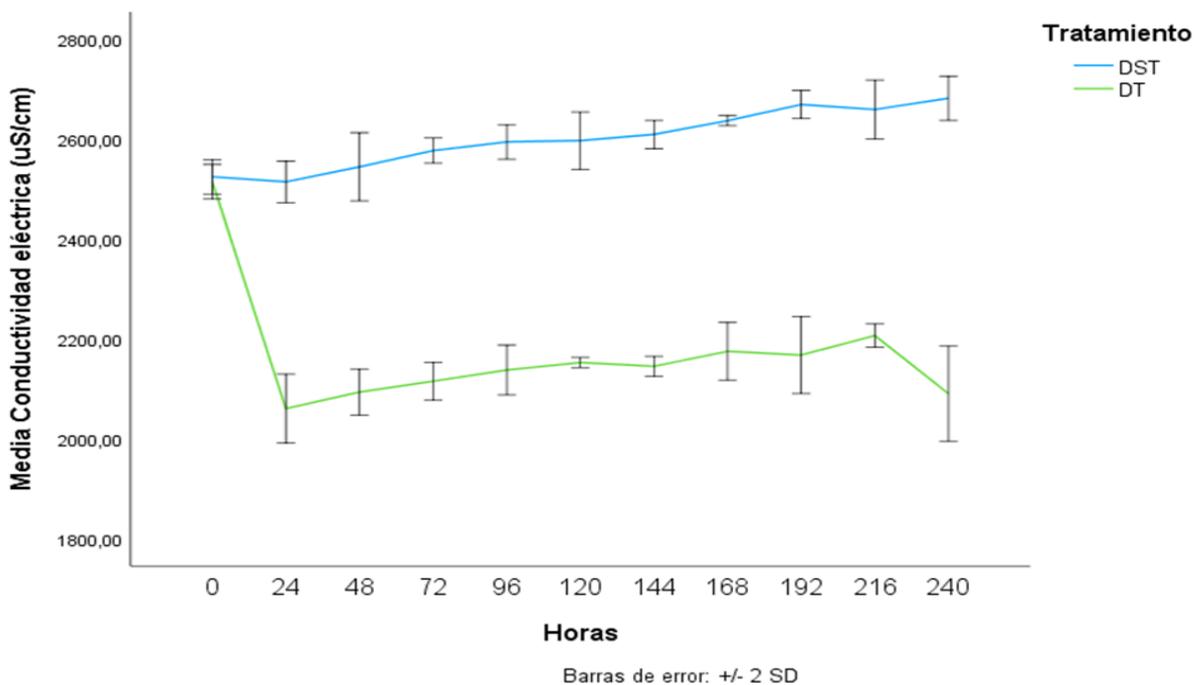


Figura 16. Conductividad eléctrica medida en horas del DST y DT.

La normalidad de los datos de alcalinidad del DT medidos en laboratorio se analizó por medio de Shapiro-Wilks, los datos de 24 y 48 horas presentaron una distribución normal con un valor ( $p > 0,05$ ), mientras que los datos a la hora 72 y 96 no presentaron una distribución normal ( $p < 0,05$ ). Sin embargo, la prueba de homogeneidad de varianzas de Mauchly mostró la paridad de varianzas a pesar que a la hora 72 y 96 los datos no siguieron una distribución normal (Anexo13; Anexo 14), por lo que se efectuó el análisis de medidas repetidas, este análisis comprobó que no existió diferencia significativa entre las 0, 24, 48 y 72 horas (Anexo 15).

En cuanto a los resultados de los análisis de concentración de los metales del DT medidos a las 24 mostraron la reducción de las concentraciones de Fe, Cu y Pb (Tabla 7 y Anexo 16). En la Figura 17 se presentan gráficamente las concentraciones de los metales (Fe, Cu y Pb) y la respectiva comparación con los límites máximos permisibles de vertido a cuerpos de agua dulce.

Tabla 7. Concentración y porcentaje de remoción de metales Fe, Cu y Pb del DAM tratado medido a las 24 horas.

Parámetro	Medida	Porcentaje de remoción	Límite máximo permisible <sup>a</sup>
Hierro (mg L <sup>-1</sup> )	2,59 <sup>b</sup>	76 %	10,00
Cobre (mg L <sup>-1</sup> )	1,20 <sup>b</sup>	71 %	1,00
Plomo (mg L <sup>-1</sup> )	0,06 <sup>b</sup>	60 %	0,20

a. TULSMA (2017).

b. Muestra homogénea.

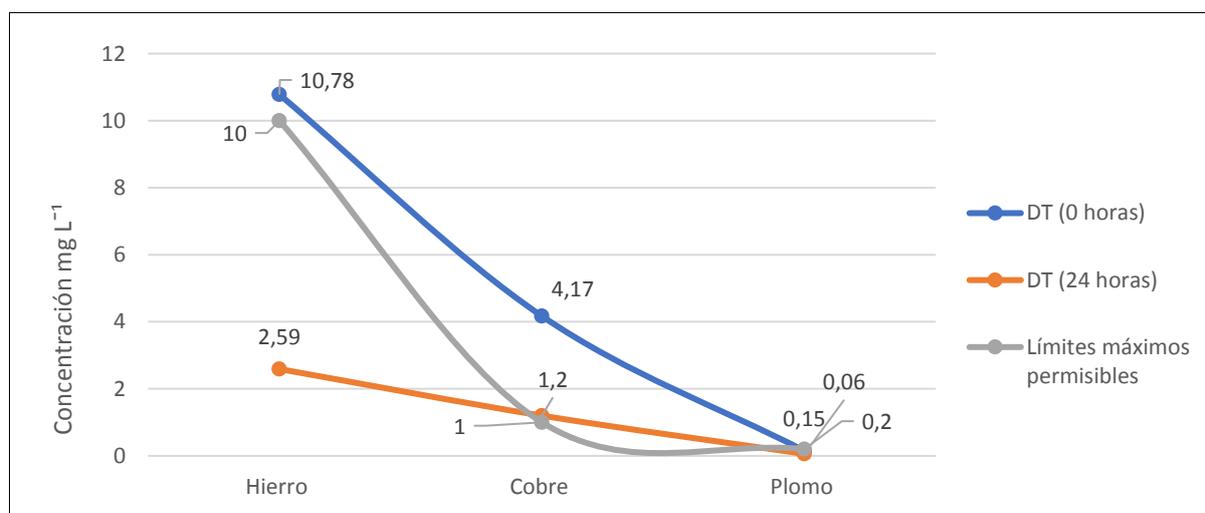


Figura 17. Comparación de la reducción de la concentración de Fe, Cu y Pb.

Finalmente, la turbidez del DST a las 0 horas fue de  $0,140 \pm 0,037$  NTU, mientras que la turbidez del DT a las 0 horas fue de  $0,165 \pm 0,054$  NTU. Por otro lado, la turbidez del DT a las 96 horas el valor incrementó a  $1,425 \pm 0,328$  NTU, posiblemente dicho aumento se dio debido a la disolución de la caliza, por lo que el DT perdió su transparencia debido a la presencia de partículas en suspensión, sin embargo, la turbidez obtenida se encuentra dentro de los Límites Máximos Permisibles de 5 NTU (OMS, 2019).

### **6.3. Propuesta de tratamiento pasivo del dren anóxico calizo como alternativa de estabilización del DAM en campo.**

Como resultado de la revisión bibliográfica sistemática, se pudo recopilar información para el planteamiento de la propuesta de tratamiento pasivo del dren anóxico calizo. Se analizó y extrajo la información de un total de diez artículos científicos relacionados con el tratamiento pasivo de los drenes anóxicos calizos para tratar los drenajes ácidos de mina como se muestra en la matriz de revisión sistemática de artículos científicos (Tabla 8).

Con respecto a la información de los artículos analizados, Johnson y Hallberg (2005) abordan el tema de los tratamientos pasivos de los drenajes ácidos de mina como una alternativa preferible antes de ser vertidos directamente a cuerpos de agua dulce, es por ello que los autores toman en cuenta los drenes anóxicos calizos para añadir alcalinidad a los DAM, considerando que estos drenes son adecuados para tratar DAM subterráneo, requiriendo un mínimo de intervención humana. Por otro lado, en el artículo de Akcil y Koldas (2006) se obtuvo información relevante a los beneficios que se obtienen a partir del tratamiento pasivo del DAM con el uso de un dren anóxico, entre los beneficios se mencionan los siguientes: eliminación de la acidez y adición de alcalinidad, aumento del pH, eliminación de metales pesados, el hierro ferroso se oxida más rápidamente a hierro férrico a un pH más bajo.

De acuerdo al artículo de Nairn et al. (1991) se extrajo información válida para el dimensionamiento del dren anóxico calizo que se ha utilizado en varios estudios destinados a tratamiento de drenajes ácidos de mina en los distritos Shade y Morrison de Estados Unidos de Norte América. Por medio del artículo Hedin, Watzlaf, et al. (1994) se recopiló información válida de drenes anóxicos calizos construidos en Canadá, en donde se obtuvieron una serie de resultados favorables para el aumento del pH, alcalinidad, reducción de metales del DAM, con la peculiaridad que en este estudio se realizaron propuestas de drenes anóxicos calizos de campo con un tiempo de vida útil de 20 años, debido a que se trataron millones volúmenes de DAM al año. Asimismo, en el artículo de Hedin (Hedin, Watzlaf, et al., 1994) se trató información acerca de los materiales complementarios (geomembranas y arcilla) que deben colocarse en el dren anóxico calizo para mejorar el éxito del tratamiento, además se recopiló información sobre las limitantes que pueden llegar a incidir en el funcionamiento del dren como el porcentaje de carbonato de calcio de la caliza, caudal y tiempo de residencia. Por otro lado, el artículo de Zamora y Mata (2017) permitió obtener las ecuaciones para la determinación de la cantidad de roca caliza a utilizarse en un tiempo determinado (5 años).

Finalmente, se obtuvo información relevante para el planteamiento del tratamiento pasivo complementario al dren anóxico calizo por medio de la revisión los artículos de Aduvire (2006); Skousen et al. (2017) y Costello (2003), quienes consideran que un tratamiento pasivo consecutivo que se complemente al dren anóxico calizo es la balsa o piscina de precipitación de metales. Este tratamiento complementario fue aplicado en la cuenca del Río Odiel -España, en donde se obtuvieron resultados exitosos para la reducción de concentración de metales como Cd, Fe, Pb, Zn, Cu, Hg. Además, este tratamiento se propone como adecuado para favorecer la oxidación y precipitación de los oxihidróxidos metálicos, de modo que la alcalinidad adquirida en el dren anóxico calizo sea suficiente para contrarrestar la acidificación.

Se seleccionó el tratamiento de piscina de precipitación de metales, debido a que el DAM luego de ser tratado con el dren anóxico calizo aún presenta concentraciones de metales pesados, y a partir de varios estudios mencionados anteriormente dicho tratamiento ha mostrado efectividad para complementar los drenes anóxicos calizos construidos en campo, de tal modo, que ha llegado a reducir la concentración de metales pesados en un 100 % de remoción de los mismos, además, cabe recalcar que la implementación de este tratamiento es de bajo valor económico y presenta una fácil operación. En la Tabla 9 se presenta la matriz de selección de tratamientos complementarios al dren anóxico calizo para tratar drenaje ácido de mina, donde se disponen criterios de selección de los tratamientos, para ello se presentan los costos de instalación y los costos de funcionamiento, los cuales tomaron equivalencias de 1(muy bajo costo); 2 (bajo costo), 3 (mediano costo); 4 (costoso); 5 (muy costoso). Mientras que, para los criterios de selección de la efectividad de remoción de metales, regulación de pH y cumplimiento con los Límites Máximos Permisibles (LMP) tomaron equivalencias de 1(muy baja eficacia); 2 (baja eficacia), 3 (mediana eficacia); 4 (eficacia); 5 (gran eficacia). A partir de la equivalencia obtenida por cada tratamiento se seleccionó el más eficaz para regular el pH, remoción efectiva de metales pesados, cumplimiento con los límites de vertido y menos costoso, en este caso resultó la piscina de precipitación de metales que se corroboró ser un tratamiento eficaz en casos de estudio analizados anteriormente.

Tabla 8. Matriz de revisión bibliográfica sistemática.

<b>Nro.</b>	<b>Título</b>	<b>Revista</b>	<b>Palabras clave</b>	<b>Idea Central</b>	<b>Referencias</b>
1	Acid mine drainage remediation	Science of the Total Environment	Acid mine drainage	Tratamientos efectivos para tratar DAM	Johnson y Hallberg (2005)
2	Acid mine drainage: causes, treatment	Journal of Cleaner Production	Passive treatment – acid drainage	Investigan para frenar el grave impacto ambiental de los DAM.	Akcil y Koldas (2006)
3	Long of Anoxic limestone drains.	Mine Water and the Environment	A preliminary review of the use of Anoxic limestone drain	Muestra el dimensionamiento de un dren en campo.	Nairn et al. (1991)
4	Passive Treatment of Acid Mine.	Journal The Environment	Complementary treatment – Acid Drainage	Las piscinas de precipitación de metales, mejoran la calidad de DAM.	Hedin et al. (1991)
5	Neutralization Acid Mine Drainage	Journal of Chemistry	Treatment passive – DAM	El dren anóxico calizo tiene la ventaja de ser viable y económico.	Utami et al. (2020)
6	Generación y tratamiento de DAM	Hydrometallurgy	Tratamientos complementarios de DAM	Los tratamientos complementarios como las piscinas de precipitación son ideales para tratar DAM.	Aduvire (2006)
7	Passive Treatment of acid mine drainage with limestone	Journal of Environmental Quality	Limestone – acid drainage	El tratamiento con drenes anóxicos resultó eficaz para tratar DAM.	Hedin et al. (1994)
8	Evaluation of design factors of a cascade aerator.	Environmental Technology	Treatment DAM – Aeration cascades	Se obtuvo un aireador en cascada que mejoró la eficiencia de una laguna de oxidación del Fe del DAM.	Oh et al. (2016)

9	Review of passive systems for acid mine drainage treatment	Mine Water and the Environment	Passive systems – Acid mine drainage	Un tratamiento pasivo neutraliza la acidez y oxidar o reduce y precipita contaminantes metálicos.	Skousen et al. (2017)
10	Propuesta técnica, tratamiento de DAM	Revistas Bolivianas	Tratamiento pasivo – dren anóxico calizo	Propuesta técnica con drenes anóxicos calizos.	Zamora y Mata (2017)

Tabla 9. Matriz de selección de tratamientos complementarios para un dren anóxico calizo a ser construido en campo.

<b>Tratamientos complementarios al dren anóxico calizo</b>					
<b>Criterios de selección</b>	<b>Humedales</b>	<b>Piscinas de precipitación</b>	<b>Sistema de barreras permeables</b>	<b>Intercambio iónico</b>	<b>Drenes óxicos calizos</b>
Costos de instalación	2	1	4	5	4
Costos de funcionamiento	3	1	3	4	4
Efectividad de remoción de metales	5	5	3	4	4
Regulación de pH	4	5	5	4	3
Cumplimiento con los LMP	4	5	3	4	3
<b>TOTAL</b>	<b>18</b>	<b>16</b>	<b>18</b>	<b>21</b>	<b>18</b>

A partir de los resultados experimentales obtenidos y las dimensiones propuestas en el estudio de Hedin, Watzlaf et al. (1994) se procedió a dimensionar un dren anóxico calizo que tendrá un tiempo de funcionamiento de 5 años aproximadamente, este dren tratará volúmenes de DAM de 4800 L día<sup>-1</sup>, 1 752 000 L año<sup>-1</sup> y 8 760 000 L en 5 años. El dren anóxico calizo tendrá un volumen de capacidad de 16,81 m<sup>3</sup>. Las dimensiones y los materiales complementarios calculados para el dren anóxico calizo se presentan en la Tabla 10.

Tabla 10. Dimensionamiento y materiales complementarios calculados para la construcción del dren anóxico calizo de 5 años de funcionamiento para la mina La Veinticuatro.

<b>Dimensión del dren</b>	<b>Medidas</b>
Profundidad de la piedra caliza	0,77 m
Profundidad de relleno	1,28 m
Ancho	0,84 m
Largo	39,24 m
<b>Materiales complementarios</b>	<b>Cantidad</b>
Geotextil (m <sup>2</sup> )	204,14 m <sup>2</sup>
Cobertura de suelo arcilla (m <sup>2</sup> )	183,20 m <sup>2</sup>

Además, se calculó la cantidad de caliza requerida para 5 años de funcionamiento del dren anóxico calizo, a partir de las ecuaciones 2, 3 y 4 descritas anteriormente en el apartado 3.4, se consideraron cuatro factores, el caudal de salida que tendrá la bomba de impulsión para transportar el DAM (600 L h<sup>-1</sup>) el tiempo de residencia (48 h), la densidad de la caliza suelta (1,4 kg L<sup>-1</sup>) y el volumen de poros de la caliza (0,50 valor constante establecido). Se determinó que se requieren 80,64 toneladas de caliza. Por otro lado, para compensar las pérdidas de disolución de la caliza se consideraron cuatro factores, el caudal de salida de la bomba de impulsión, el valor de alcalinidad a alcanzarse (133 mg L<sup>-1</sup> o 0,133 g L<sup>-1</sup>), el tiempo de 5 años (43 800 h) y el contenido de carbonato de calcio expresado en decimal (0,82). Se determinó que se necesitan 4,26 toneladas de caliza. Por lo tanto, para un tiempo de funcionamiento de 5 años del dren anóxico calizo se requerirá un total de 84,90 toneladas de roca caliza, es decir 16,98 toneladas de caliza a utilizarse en un año, dicho tiempo será el de vida útil de la caliza, una vez cumplido este tiempo se deberá reponer con la misma cantidad de caliza cada año (16,98 Tn), a continuación, se presentan los cálculos de las cantidades necesarias de caliza para el tratamiento del dren anóxico calizo.

### Cantidad de roca caliza a ocuparse

$$[ M = (Q * \rho * tR) / Vp ]$$

$$M = \frac{600 \frac{L}{h} * 1,4 \frac{kg}{L} * 48 h}{0,50}$$

$$M = \frac{80\,640 \text{ kg}}{1\,000}$$

$$M = 80,64 \text{ Tn}$$

### Cantidad de roca caliza a ocuparse por pérdidas de disolución

$$[ M = (Q * C * T) / X ]$$

$$M = \frac{600 \frac{L}{h} * 0,133 \frac{g}{L} * 43\,800 h}{0,82}$$

$$M = \frac{4\,262\,488 \text{ g}}{1\,000\,000}$$

$$M = 4,26 \text{ Tn}$$

### Cantidad total de roca caliza a ocuparse en 5 años

$$[ M = (Q * \rho * tR) / Vp + (Q * C * T) / X ]$$

$$M = 80,64 \text{ Tn} + 4,26 \text{ Tn}$$

$$M = 84,90 \text{ Tn}$$

### Cantidad total de roca caliza a ocuparse en 1 año

$$M = \frac{84,90 \text{ Tn}}{5 \text{ años}}$$

$$M = 16,98 \text{ Tn/año}$$

Las actividades mineras subterráneas realizadas en el crucero Nro. 4 de la mina La Veinticuatro han generado drenaje ácido de mina (DAM), con la consecuente infiltración a las zonas subterráneas aledañas, dichas zonas pertenecen a diferentes sociedades mineras y se caracterizan por encontrarse a profundidades verticales mayores a los 100 metros, en donde a simple vista la caída del DAM proveniente del crucero Nro. 4 es eminente. Debido a la

profundidad del cruce se hace necesario la implementación de un sistema de recolección y bombeo del DAM. Para la implementación del sistema de recolección se propone implementar un tanque plástico recolector de DAM (600 L) en el punto donde nace el efluente, este volumen obtenido de acuerdo al caudal de salida que tendrá la bomba de impulsión, el tanque tendrá la función de recolectar el DAM hasta su capacidad máxima para su posterior transporte. Mientras que, para el sistema de bombeo se propone utilizar una bomba impulsión PENTAX WATER PUMP, la cual tendrá como características mínimas un caudal (Q) de  $10 \text{ L min}^{-1}$  o  $600 \text{ L h}$  y una altura de bomba (H) de 50 metros, esta funcionará con un requerimiento de energía de 220 voltios, una potencia de impulsión de 2,5 HP y a una temperatura máxima del líquido  $90 \text{ }^\circ\text{C}$ ; la bomba de impulsión tendrá un revestimiento epoxi para evitar la posible corrosión del material originada por el DAM (ANDRITZ, 2018). La bomba estará conectada al tanque recolector por medio de una manguera de 2 pulgadas, esta bomba transportará el DAM desde el tanque recolector hasta la entrada principal del dren anóxico calizo, también se requiere un kit de tuberías y accesorios (acople de manguera flexible de 2 pulgadas, válvulas de paso) para el sistema de bombeo como se presenta en la Figura 18.

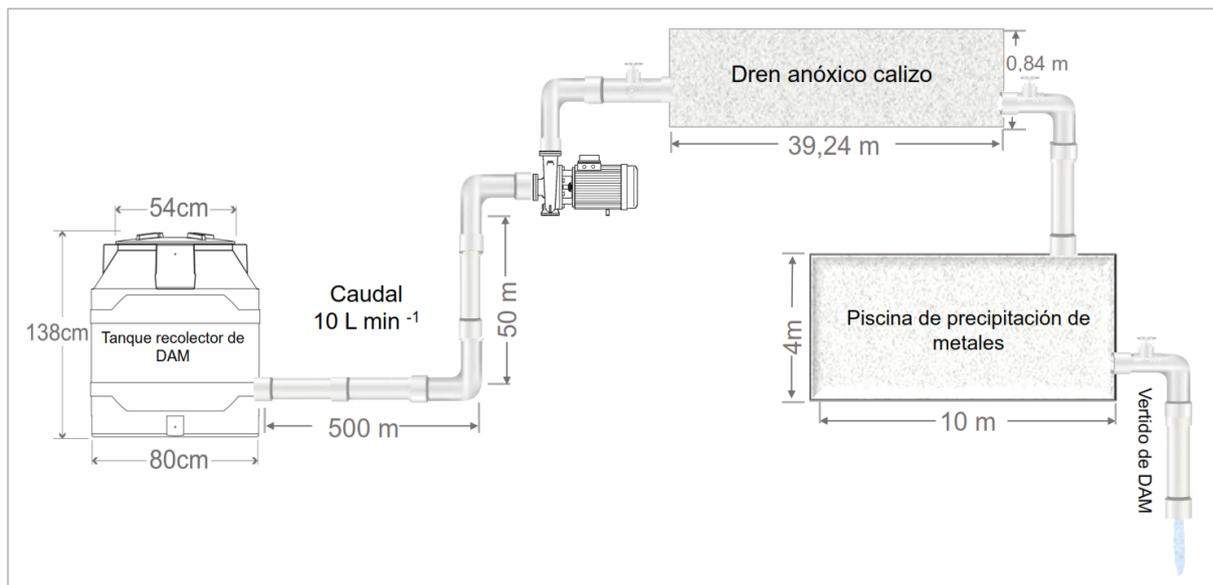


Figura 18. Propuesta de implementación del dren anóxico calizo para la mina La Veinticuatro.

De acuerdo a los datos experimentales obtenidos anteriormente, se propone que el DAM que ingrese al dren anóxico calizo permanezca un tiempo de residencia de 48 horas, ya que dicho tiempo fue el necesario para que se produzca la neutralización del pH; posteriormente el DAM será vertido por medio de una tubería de 4 pulgadas de diámetro y 1,5 m de longitud,

dimensiones recomendadas por Hedin, Watzlaf, et al. (1994), dicha tubería estará conectada a la salida del dren anóxico calizo y verterá directamente el DAM tratado al tratamiento alternativo de piscina de precipitación de metales, esta será rectangular (1,50 m profundidad; 4 m ancho; 10 m largo) y estará acondicionada con material geotextil. Con la implementación del tratamiento alternativo se busca la precipitación completa de los metales, de manera que complemente la técnica pasiva del dren anóxico calizo para que los parámetros del DAM tratado se encuentren dentro de los límites máximos permisibles de vertido a cuerpos de agua dulce.

En la Tabla 11 se presentan los costos totales estimados para la construcción del tratamiento propuesto (dren anóxico calizo y piscina de precipitación de metales). Además, en la Tabla 12 se presentan los costos operacionales para la implementación del dren anóxico calizo para la mina La Veinticuatro.

Tabla 11. Costos estimados para la construcción del dren anóxico calizo y la piscina de precipitación de metales en la mina La Veinticuatro.

<b>Descripción</b>	<b>Precio unitario (USD)</b>	<b>Unidades</b>	<b>Cantidad requerida</b>	<b>Costo total Anual (USD)</b>
Excavación y ampliación del dren anóxico calizo y piscina de precipitación de metales.	5,00	USD/m <sup>2</sup>	100	500,00
Implementación del dren anóxico calizo	500,00	USD	1	500,00
Adquisición de roca caliza	20,00	USD/Ton	84,90	1698,00
Transporte de roca caliza	80,00	USD/Volqueta	28	2240,00
Bomba de agua Jet 1	600,00	USD/m <sup>3</sup>	1	600,00
Kits de acoples y mangueras	300,00	USD/m <sup>3</sup>	3	900,00
Material geotextil	673,00	USD/120 m <sup>2</sup>	204,14	1144,89
Arcilla	8,00	USD/m <sup>2</sup>	183,20	1465,60
<b>Costo</b>				<b>9 048,49</b>
<b>Imprevisto 15 %</b>				<b>1 357,27</b>
<b>Costo Total (USD)</b>				<b>10 405,76</b>

Tabla 12. Costos operacionales del dren anóxico calizo en la mina La Veinticuatro.

<b>Descripción</b>	<b>Precio unitario (USD)</b>	<b>Unidades</b>	<b>Cantidad requerida</b>	<b>Costo Mensual (USD)</b>	<b>Costo Anual (USD)</b>
Sueldos al personal	425,00	USD/Mensual	1	425,00	5 100,00
Seguros de salud	32,00	USD/Mensual	1	32,00	384,00
Mantenimiento del dren	500,00	USD	1	500,00	500,00
Energía eléctrica	0,096	USD/kWh	-	150,00	1 800,00
<b>Costo</b>				<b>1 107,00</b>	<b>7 784,00</b>
<b>Imprevisto 15 %</b>				240,90	1 167,60
<b>Costo Total (USD)</b>				<b>1 347,90</b>	<b>8 951,60</b>

## 7. Discusión

En el presente estudio, el prototipo experimental del dren anóxico calizo mostró éxito para modificar las características fisicoquímicas del DAM, debido al adecuado dimensionamiento, construcción y consideración de factores básicos. Entre los factores elementales se consideró el contenido de  $\text{CaCO}_3$  del 82,44% y el tamaño de la roca caliza de 5 cm, estas especificaciones fueron dadas por la empresa Calizas Chimborazo, además se consideró un tiempo de retención hidráulico de 24 horas y la temperatura fue variable durante el experimento. Por lo tanto, en el prototipo experimental el porcentaje de  $\text{CaCO}_3$  fue menor, mientras que el tamaño de la roca caliza fue mayor y el tiempo de retención hidráulico igual a los mostrados por Brodie et al. (1991) quienes consideraron un contenido de  $\text{CaCO}_3$  del 90%, un tamaño de la roca caliza de 2 a 4 cm, un tiempo de retención hidráulico de 24 horas y una temperatura constante (18 °C), donde obtuvieron un menor éxito en el tratamiento, que se atribuye a factores como el tamaño de la roca caliza, que al haber sido más pequeño se disolvió con mayor rapidez. Cravotta (1998) menciona que los tamaños pequeños de caliza causan taponamientos en la tuberías y generan baja reactividad de neutralización en los drenes anóxicos calizos experimentales; por tanto, el éxito del tratamiento mejora por un buen dimensionamiento y construcción de este tipo de drenes (Cravotta, 2003).

La escasa información para dimensionar y construir prototipos experimentales de drenes anóxicos calizos, dificultó el punto de partida para su construcción. Sin embargo, por medio de la determinación del caudal en campo se obtuvo el dato inicial de  $5 \text{ L min}^{-1}$ . Por esta razón, se evidenció que sin la medición inicial del caudal se vería afectado directamente el dimensionamiento y construcción del prototipo, como lo corroboran Watzlaf et al. (2000) quienes manifiestan que para el dimensionamiento de un prototipo experimental de dren anóxico calizo el punto de partida principal es la obtención del caudal en campo por medio del método volumétrico, ideal para caudales pequeños, y como medida de seguridad, el caudal obtenido en campo cambiará de unidades de L a mL (Bailey, 2018).

En lo que respecta a la caracterización fisicoquímica del drenaje ácido de mina sin tratar (DST) *in situ*, los valores correspondientes a pH (2,71), la conductividad eléctrica (2350  $\mu\text{S/cm}$ ) y las altas concentraciones de metales Fe (10,78) Cu (4,17) y Pb (0,15) se asemejan a los reportados por Moreno y Palacios (2017), los cuales mostraron que el DST tuvo un pH (2,61), una conductividad eléctrica (2617  $\mu\text{S/cm}$ ) y una concentración de metales de Cu (4,2) y Pb (0,2), los valores obtenidos de dichos parámetros son causados posiblemente por la

oxidación de minerales, particularmente sulfuros asociados a minas metálicas, carbón y pirritas. Mientras que el valor correspondiente a la concentración de Fe ( $200,6 \text{ mg L}^{-1}$ ) mostrado por Moreno & Palacios (2017) fue veinte veces mayor al del presente estudio, lo que podría deberse a la sobreoxidación de sulfuros metálicos, especialmente pirita ( $\text{FeS}_2$ ) en presencia de oxígeno atmosférico y agua, que en este caso superan los límites máximos permisibles y se los puede considerar como contaminantes.

Por otro lado el color característico de las muestras del DST fue transparente con aparente turbidez, este color de DAM no coincide con el color naranja rojizo del DAM indicado en el estudio de Rivera et al. (2020), este color característico podría deberse posiblemente a que a un pH inferior a 3,5 la reacción es catalizada por la bacteria *Thiobacillus ferrooxidans*, ya que por lo general a un pH entre 2,3 a 3,5 el ion férrico por hidrólisis precipita como hidróxido  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  (Aduvire, 1991).

El pH del DST en el presente experimento medido con el analizador portátil *in situ* evidenció a las 0 horas un valor promedio de 2,91 similar al pH del DST medido en el laboratorio a las 0 horas fue de 2,74. Por otro lado, el pH del drenaje ácido de mina tratado (DT) medido en el laboratorio alcanzó la neutralidad ( $\text{pH}=7$ ) al cabo de 96 horas. Tanto el pH del DST y del DT medidos en el laboratorio son relativamente similares a los valores promedios de laboratorio reportados por Kusin et al., (2013) quienes mostraron un pH del drenaje ácido de mina sin tratar de 4,09 (0 horas) y para el drenaje ácido de mina tratado de 6,58 (96 horas). La variación en los valores de pH constató que los drenes anóxicos calizos fueron ideales para alcanzar la neutralidad del DAM. El aumento prolongado del pH del drenaje ácido de mina tratado se debe principalmente al contacto que tuvo este con la roca caliza que produce la neutralización del ácido con una base, como lo indica la ecuación determinada por Aduvire, (1991) :  $\text{H}_2\text{SO}_4 (\text{d}) + \text{CaCO}_3 (\text{s}) \rightarrow \text{CaSO}_4 (\text{s}) + 2 \text{H}_2\text{O} (\text{l}) + \text{CO}_2 (\text{g})$  en donde el  $\text{H}_2\text{SO}_4$  representa la fase diluida, el  $\text{H}_2\text{O}$  representa la fase líquida, el  $\text{CaCO}_3$  y  $\text{CaSO}_4$  la fase sólida y el  $\text{CO}_2$  la fase gaseosa.

La conductividad eléctrica del DST en el presente experimento medida con el analizador portátil *in situ* evidenció a las 0 horas un valor promedio de 2525 uS/cm similar a la conductividad eléctrica del DST medido en el laboratorio a las 0 horas de 2476 uS/cm. Por otra parte, la conductividad eléctrica del DT medida en laboratorio al cabo de 96 horas demostró una tendencia a la disminución de la conductividad eléctrica (2072 uS/cm). Estos resultados se asemejan a los reportados por Guayasamín (2016) quién mostró que la

conductividad eléctrica del drenaje ácido de mina tratado disminuyó de 2100 uS/cm a 2000 uS/cm a las 96 horas. Sin embargo, en este estudio se observó que a mayor tiempo transcurrido se produjo un aumento en la concentración de iones de Ca y Mg alcanzando los 2900 uS/cm, esto se debió posiblemente al incremento del material calcáreo durante el experimento. Los resultados de conductividad eléctrica de ambos estudios atribuyen implicaciones leves de contaminación ambiental (Dorrnsoro, 2001); es por ello que se consideró a la conductividad eléctrica de uso dudoso para los animales y para el riego, ya que sobrepasan los Límites Máximos Permisibles (1000 uS/cm) (Moreno y Palacios, 2017).

Por otro lado, el parámetro de alcalinidad del DT obtenido en laboratorio mostró un valor mínimo de 44,5 mg L<sup>-1</sup> y un valor máximo de 66,5 mg L<sup>-1</sup>. Los resultados de alcalinidad del DT se asemejan a los reportados por Kusin et al. (2013) quienes encontraron una alcalinidad mínima del drenaje ácido de mina tratado de 47 mg L<sup>-1</sup> y la alcalinidad máxima de 64 mg L<sup>-1</sup>, estos valores indican que en un dren anóxico calizo experimental la retención de CO<sub>2</sub> puede mejorar la disolución de caliza y la producción de alcalinidad (UGR, 2018).

En lo que respecta a las concentraciones de los metales del DT durante el tiempo de retención hidráulico (24 horas), el Fe tuvo un porcentaje de remoción del 76% que fue menor al reportado por Moreno y Palacios (2017) de 99,29%. Mientras que el Cu tuvo un porcentaje de remoción del 71% similar al reportado por Moreno y Palacios (2017) de 68%; finalmente el Pb tuvo un porcentaje de remoción del 60% que fue menor al reportado por Moreno y Palacios (2017) de 83,33%. El mayor porcentaje de remoción de la concentración de los metales se debió al porcentaje de CaCO<sub>3</sub> de la caliza (95%) que favoreció el aumento del pH del DAM por la disolución de la calcita y la precipitación de metales trivalentes. En ambos estudios, la reducción de la concentración del Fe pudo darse por varios procesos de oxidación (biótica y abiótica), por precipitación de hidróxidos metálicos o por eliminación de iones de metales pesados por intercambio iónico (Motsi et al., 2009). Mientras que la remoción de Cu pudo darse por diversos procesos de adsorción y coprecipitación con precipitados de Fe (Macías, 2013) formando sulfato de cobre como manifiesta Caraballo et al. (2010). Finalmente, la reducción en la remoción del Pb se dio posiblemente por adsorción y coprecipitación, de modo que llega a precipitarse como fosfato y sulfato de plomo a pH entre 6 y 6,6 como menciona Oliva et al. (2010). Cabe señalar que en ambos estudios las concentraciones de los metales se encuentran dentro de los límites máximos permisibles de vertido a cuerpos de agua dulce.

La propuesta del dren anóxico calizo para el tratamiento del DAM en la mina La Veinticuatro consideró un tiempo de vida útil de 5 años del dren anóxico calizo, un caudal de  $10 \text{ L min}^{-1}$  y una cantidad anual de roca caliza de 16,98 toneladas que será repuesta cada año (tiempo estimado de disolución de la roca caliza), en total se utilizarán 84.90 toneladas de roca caliza en 5 años, este último resultado difiere con el reportado por Zamora y Mata (2017) quienes consideraron los mismos años de vida útil del dren anóxico calizo, con la diferencia que se obtuvo una cantidad total de caliza de 6 280,90 toneladas, es decir 74 veces mayor. La principal razón por la que difieren ambos resultados es por el caudal que ingresará diariamente al dren anóxico calizo y el tiempo de residencia establecido. Esto trae como consecuencia que, si se trata un caudal con un tiempo de residencia menor, la cantidad de caliza a utilizarse será baja en comparación a la cantidad de caliza requerida para un caudal y tiempo de residencia. Se puede corroborar que el caudal y el tiempo de residencia son los principales factores para la correcta determinación de la cantidad de roca caliza, como lo indica Mamani et al. (2018) el caudal y tiempo de residencia estarán directamente relacionados con la cantidad de roca caliza a utilizarse en un dren anóxico calizo, incluso llegando a incidir en las pérdidas de disolución de la roca caliza.

Para el funcionamiento eficaz de un dren anóxico calizo en campo es necesario que se acondicione el mismo a través de materiales complementarios como membrana geotextil y arcilla natural, para el presente estudio la cantidad de membrana geotextil a ocuparse será de  $204,14 \text{ m}^2$ , mientras que la cantidad de arcilla será de  $183,20 \text{ m}^2$ , estos requerimientos se consideran fundamentales para acondicionar un dren anóxico calizo. Zamora y Mata (2017) realizaron 2 drenes anóxicos calizos en campo con tiempos de vida útil de 5 y 20 años, para dicho proyecto se necesitaron mayores cantidades de materiales complementarios, esto se produjo debido a que el volumen de DAM a tratar se obtuvo de 2 minas abandonadas, por lo que tuvo relación que a mayor DAM a tratarse se deberá proporcionar y acondicionar con mayor cantidad de materiales complementarios, por esta razón se hace necesario conocer previamente el volumen del DAM que se tratará diariamente para construir y acondicionar adecuadamente un dren anóxico calizo (Mamani et al., 2018).

Por otro lado, para mejorar el éxito del dren anóxico calizo se hace necesario la implementación de una técnica complementaria, para ello se propone la construcción de una piscina de precipitación de metales que se encontrará posterior al dren anóxico calizo. Bejarano y Estacio (2019) afirman que con esta técnica complementaria se optimiza el tratamiento pasivo

ya que los parámetros fisicoquímicos del DAM se encontrarán dentro de los límites máximos permisibles de vertido a cuerpos de agua dulce. Asimismo, Denegri y Iannacone (2020) mencionan que las técnicas complementarias de los humedales aerobios y anaerobios también ofrecen múltiples beneficios como la purificación total del drenaje ácido de mina tratado por fitorremediación, un ambiente paisajístico y recreativo, además de servir como hábitat de biodiversidad de fauna donde se minimice la contaminación de la cadena trófica.

## 8. Conclusiones

- Los datos experimentales mostraron que el prototipo experimental del dren anóxico calizo fue exitoso para el tratamiento pasivo del DAM y demostró su potencial para modificar eficazmente las características fisicoquímicas del DAM, como para reducir la concentración de metales y mejorar el pH creando condiciones favorables para su vertido. Para ello, fue necesario la construcción adecuada y consideraciones de factores básicos para el prototipo experimental como el tiempo de retención hidráulico establecido de 24 h y el caudal experimental obtenido de  $5 \text{ mL min}^{-1}$ .
- El tratamiento pasivo efectuado con el dren anóxico calizo experimental fue capaz de modificar el pH del DAM, desde ácido (2,73) a neutro (7,00), esto se dio por la adición de caliza que permitió que se produzca la reacción de neutralización del DAM y por ende que este DT cumpla con los límites máximos permisibles de la normativa ambiental vigente de los límites de descarga a un cuerpo de agua dulce. Por otro lado, la conductividad eléctrica del DT disminuyó gradualmente en relación con la del DST, esta reducción se generó posiblemente por la precipitación y oxidación de Cu, Fe y Pb. Mientras que para el DT la alcalinidad máxima y mínima fueron de 66 mg/L y 44,5 mg/L respectivamente. Por otra parte, se obtuvo porcentajes de remoción de metales del DT, entre ellos el Fe 76%, Cu 71%, finalmente el Pb con 60% respectivamente, la eliminación de los metales pesados se produjo por la precipitación de hidróxidos metálicos en solución.
- Dado que el prototipo experimental del dren anóxico calizo fue exitoso para tratar el DAM, es posible proponer un dren anóxico calizo para ser implementado en campo, el cual tendrá una vida útil de 5 años con un dimensionamiento (ancho: 0,84 m; largo: 39,24 m; profundidad: 1,28 m), los costos aproximados de construcción serán de 10 405,76 dólares, mientras que los costos operacionales de 8 951,60 dólares. Para complementar el tratamiento pasivo se propuso la construcción de una piscina de precipitación de metales que tendrá un dimensionamiento (ancho: 4 m; largo: 10 m; profundidad: 1,50 m). Esta propuesta está encaminada a reducir la contaminación del vertido directo del DAM al ambiente, e impulsar la implementación de los drenes anóxicos calizos en minas en operación y abandonadas.

## 9. Recomendaciones

- Impulsar el tratamiento pasivo de los drenajes ácidos de mina (DAM) producidos durante y después de las actividades mineras en la zona 7 y a nivel nacional, con la finalidad de que el DAM sea tratado antes de ser vertido a los diferentes cuerpos de agua. Considerando al dren anóxico calizo como una alternativa de bajo costo y alta eficacia para neutralizar dichos DAM.
- Antes de iniciar la construcción de un dren anóxico calizo en campo se recomienda realizarlo a escala experimental, con el objetivo de conocer el rendimiento real del sistema, ya que los drenes anóxicos calizos en campo pueden ser alterados comúnmente por las condiciones climáticas, la ubicación, entre otros.
- Realizar el tratamiento pasivo del dren anóxico calizo experimental durante varios meses y con varias repeticiones, con el objetivo de obtener suficientes datos de los parámetros fisicoquímicos, para así conocer el comportamiento del DAM al ser tratado con roca caliza.
- Se recomienda elaborar protocolos de análisis en el laboratorio de Suelos, y Bromatología y en el laboratorio Ambiental de la UNL, a fin de analizar una mayor cantidad de metales en el agua, debido a que es de suma importancia contar con múltiples análisis para una caracterización completa de este tipo de contaminantes y tomar las medidas respectivas para mitigar el impacto ambiental.
- Ya que en el presente estudio se han obtenido resultados prometedores de acuerdo con el dimensionamiento, diseño y construcción del dren anóxico calizo experimental, es necesario que para futuras investigaciones se controlen condiciones ambientales como la temperatura antes del comienzo del tratamiento pasivo, además es importante que se complemente la técnica implementada con otras técnicas pasivas posteriores al tratamiento que permitan mayor eficiencia a escala experimental y en campo.

## 10. Bibliografía

- Aduvire, O. (1991). Drenaje Ácido de Mina. Generación y Tratamiento. *Instituto Geológico y Minero de España*, 2, 51.
- Aduvire, O. (2006). Drenaje ácido de mina generación y tratamiento. *Instituto Geológico y Minero de España*, 2, 50.
- Akcil, A., y Koldas, S. (2006). Acid Mine Drainage (AMD): causes, treatment and case studies. *Journal of Cleaner Production*, 14(12-13 SPEC. ISS.), 1139–1145.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2004.09.006>
- ANDRITZ. (2018). Tecnología de bombeo de primera para agua para la industria minera. En *Engineered succes* (p. 16).  
<https://www.andritz.com/resource/blob/34054/de043aab9313508fea7c567fa24f4186/hy-andritz-pumps-mining-brochure-es-data.pdf>
- Avila, R. (2015). *Vista General de la Actividad Minera y sus Impactos* (pp. 3–20).
- Bailey, A. (2018). *The application of sandstone to reduce limestone armoring in acid* (Número May).
- Banks, D., Younger, P. L., Arnesen, R. T., Iversen, E. R., y Banks, S. B. (1997). Mine-water chemistry. *Environmental Geology*, 32(3), 157–174.  
<https://doi.org/10.1007/s002540050204>
- Barreto, P. (2017). Protocolo De Monitoreo De Agua. *Revista Mexicana De Ingenieros Químicos*, 1(2), 1–39.  
[https://biorem.univie.ac.at/fileadmin/user\\_upload/p\\_biorem/education/research/protocols/Protocolo\\_Agua.pdf](https://biorem.univie.ac.at/fileadmin/user_upload/p_biorem/education/research/protocols/Protocolo_Agua.pdf)
- Bejarano, J., y Estacio, M. (2019). *Propuesta de tratamiento de drenes anóxico calizo combinado con humedal en la mina Michiquillay- Encañada, 2019* [Universidad Privada del Norte].  
[https://repositorio.ulima.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12724/3143/Loayza\\_Uyehara\\_Alexander.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.ulima.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12724/3143/Loayza_Uyehara_Alexander.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

- Brodie, G. A., Britt, C. R., Tomaszewski, T. M., y Taylor, H. N. (1991). Use of Passive Anoxic Limestone Drains to Enhance Performance of Acid Drainage Treatment Wetlands. *Journal American Society of Mining and Reclamation*, 1991(1), 211–228. <https://doi.org/10.21000/jasmr91010211>
- Caraballo, M., Macías, F., Rötting, T., Nieto, J., y Ayora, C. (2010). Tratamiento pasivo con un sustrato alcalino disperso de drenajes ácidos de mina con alta carga metálica en la cuenca del río Odiel ( Faja Pirítica Ibérica , SO España ). *Geogaceta*, 48, 111–114.
- Chaparro, L. (2015). Drenajes ácidos de mina formación y manejo. *Revista ESAICA*, 1(1), 53. <https://doi.org/10.15649/24225126.272>
- Costello, C. (2003). Acid Mine Drainage: Innovative Treatment Technologies. *National Networ of Enrionmental Managment Studies Fellow, U.S. EPA*, 52.
- Cravotta, C. (1998). Oxic limestone drains for treatment of dilute, acidic mine drainage. *Nineteenth Annual West Virginia Surface Mine Drainage Task Force Symposium*, 1–28. <https://pubs.er.usgs.gov/publication/70189499>
- Cravotta, C. (2003). Tamaño y rendimiento de los drenajes de piedra caliza anóxica para neutralizar el drenaje ácido de la mina. *Evironmental*, 32, 1277–1289.
- Denegri, J., y Iannacone, J. (2020). Tratamiento De Drenaje Ácido De Minas Mediante Humedales Artificiales. *Biotempo*, 17(2), 345–369. <https://doi.org/10.31381/biotempo.v17i2.3349>
- Dorronsoro, C. (2001). *AGUAS PARA USO AGRÍCOLA SALINIDAD DEL AGUA DE RIEGO*. Universidad de Granada. [https://fcc.es/documentos/05\\_documentos\\_por\\_temas/Estandares de calidad de las aguas Tablas de estandares\(3\)/Salinidad\\_del\\_agua\\_de\\_riego.pdf](https://fcc.es/documentos/05_documentos_por_temas/Estandares%20de%20calidad%20de%20las%20aguas%20Tablas%20de%20estandares(3)/Salinidad_del_agua_de_riego.pdf)
- Dutta, M., Saikia, J., Taffarel, S. R., Waanders, F. B., Medeiros, D. De, Cutruneo, C. M. N. L., Silva, L. F. O., y Saikia, B. K. (2017). Geoscience Frontiers Environmental assessment and nano-mineralogical characterization of coal , overburden and sediment from Indian coal mining acid drainage. *Geoscience Frontiers*, 8(6), 1285–1297. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2016.11.014>

- FIDH. (2010). Intervención minera a gran escala en Ecuador y vulneración de derechos humanos. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699.
- FMAM. (2020). *Línea de base nacional para la minería artesanal y en pequeña escala de oro en Ecuador, conforme la convención de minamata sobre mercurio*. <https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2020/06/NAP-Inventario-de-Mercurio-Ecuador.pdf>
- GAD Portovelo. (2015). *Plan de desarrollo y ordenamiento territorial del cantón Portovelo*. <http://docshare01.docshare.tips/files/26310/263102602.pdf>
- Guayasamín, J. (2016). *Implementación, a nivel laboratorio, de un sistema de tratamiento pasivo tipo sustrato alcalino disperso, para la remediación de metales pesados de drenaje ácido de mina* [Escuela Politécnica Nacional]. <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjCr8fGoZn2AhUDRzABHYcmBHsQFnoECAUQAQ&url=https%3A%2F%2Fbibdigital.epn.edu.ec%2Fhandle%2F15000%2F16501&usg=AOvVaw3HKQjo4cuUh0B6f2H3Atc1>
- Hach Company. (2001, mayo 1). *sesion 156 Portable Multiparameter*. 54650, 96. [https://www.fondriest.com/pdf/hach\\_sesion156\\_manual.pdf](https://www.fondriest.com/pdf/hach_sesion156_manual.pdf)
- Hedin, R., Nairn, R., y Kleinmann, R. (1994). *Information Circular 9389 : Passive treatment of coal mine drainage*. 1–44. <https://www.arcc.osmre.gov/resources/impoundments/BoM-IC-9389-PassiveTreatmentofCoalMineDrainage-Hedinetal1993.pdf>
- Hedin, R., Watzlaf, G., y Nairn, R. (1994). Passive Treatment of Acid Mine Drainage with Limestone. *Journal of Environmental Quality*, 23(6), 1338–1345. <https://doi.org/10.2134/jeq1994.00472425002300060030x>
- Johnson, D. B., y Hallberg, K. B. (2005). Acid mine drainage remediation options: A review. *Science of the Total Environment*, 338(1-2 SPEC. ISS.), 3–14. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.09.002>
- Kaur, H., Girdhar, M., y Mohan, A. (2018). Acid mine drainage: An introduction and treatment

- strategies. *Pollution Research*, 37(July), S82–S90.
- Kefeni, K., Msagati, T., y Mamba, B. (2017). Acid mine drainage: Prevention, treatment options, and resource recovery: A review. *Journal of Cleaner Production*, 151(3), 475–493. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.082>
- Kusin, F., Aris, A., y Shayeeda, A. (2013). A Comparative Study of Anoxic Limestone Drain and Open Limestone Channel for Acidic Raw Water Treatment. *International Journal of Engineering & Technology*, 13(06), 87–92.
- Lazo, D. (2020). Acid mine drainage mitigation: A review. *Ingeniería Industrial*, 39(039), 97–118. <https://doi.org/10.26439/ing.ind2020.n039.4917>
- Ley de Minería. (2009). *Ley de Minería* (p. 47). [http://www.oas.org/juridico/PDFs/mesicic4\\_ecu\\_mineria.pdf](http://www.oas.org/juridico/PDFs/mesicic4_ecu_mineria.pdf)
- Li, Y., Li, W., Xiao, Q., Song, S., Liu, Y., y Naidu, R. (2018). Acid mine drainage remediation strategies: A review on migration and source controls. *Minerals and Metallurgical Processing*, 35(3), 148–158. <https://doi.org/10.19150/mmp.8464>
- Lillo, J. (2008). Actividades antropogénicas, impactos sobre medio ambiente. *Grupo de estudios en minería y medioambiente*, 1–38. [https://www.ucm.es/data/cont/media/www/pag-15564/Impactos de la minería - Javier Lillo.pdf](https://www.ucm.es/data/cont/media/www/pag-15564/Impactos%20de%20la%20miner%C3%ADa%20-%20Javier%20Lillo.pdf)
- López, A. (2016). Pruebas de tratamiento de drenaje ácido en un sistema continuo de celdas con rocas filita y caliza. En *Revista AIDIS* (Vol. 13). UNAM.
- Macías, F. (2013). Estudio mineralógico y geoquímico de la optimización de un sistema de tratamiento pasivo de drenaje ácido de mina con alta carga metálica. En *Historia*.
- MAE. (2018). Reglamento ambiental de actividades mineras. *Registro oficial suplemento 213*, 54. [http://www.silec.com.ec/Webtools/LexisFinder/DocumentVisualizer/FullDocumentVisualizerPDF.aspx?id=AMBIENTE-REGLAMENTO\\_AMBIENTAL\\_DE\\_ACTIVIDADES\\_MINERAS\\_MINISTERIO\\_AMBIENTE](http://www.silec.com.ec/Webtools/LexisFinder/DocumentVisualizer/FullDocumentVisualizerPDF.aspx?id=AMBIENTE-REGLAMENTO_AMBIENTAL_DE_ACTIVIDADES_MINERAS_MINISTERIO_AMBIENTE)

- Mamani, M., Trujillo, E., y Zamora, G. (2018). Propuesta técnica, económica y ambiental para el tratamiento de las aguas ácidas de la mina huanuni mediante drenes anóxicos calizos y precipitación con cal. *Revista de medio ambiente y minería*, 4, 3–17. [http://www.scielo.org.bo/scielo.php?pid=S2519-53522018000100001&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.org.bo/scielo.php?pid=S2519-53522018000100001&script=sci_arttext)
- Martínez, N. M., Basallote, M. D., Meyer, A., Cánovas, C. R., Macías, F., y Schneider, P. (2019). Life cycle assessment of a passive remediation system for acid mine drainage: Towards more sustainable mining activity. *Journal of Cleaner Production*, 211, 1100–1111. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.224>
- MERNNR. (2020). *Plan Nacional De Desarrollo del Sector Minero 2020-2030*. <http://plan.senplades.gov.ec>
- Ministerio de Energía y Recursos Naturales no Renovables. (2020). *Plan Nacional De Desarrollo Del Ecuador del Sector Minero*. 226. <https://www.recursoyenergia.gob.ec/wp-content/uploads/2020/10/Plan-Nacional-de-Desarrollo-del-Sector-Minero-2020-2030.pdf>
- Moodley, I., Sheridan, C. M., Kappelmeyer, U., y Akcil, A. (2018). Environmentally sustainable acid mine drainage remediation: Research developments with a focus on waste/by-products. *Minerals Engineering*, 126(August), 207–220. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2017.08.008>
- Morales, J. F. (2016). Conceptos ambientales para entender la contaminación y los impactos ambientales generados por el extractivismo. *TERRAE*, 1, 88.
- Moreno, A., y Palacios, T. (2017). Tratamiento de drenaje ácido de mina con el uso de zeolita natural a escala experimental. *FIGEMPA: Investigación y Desarrollo*, 1(2), 29–40. <https://doi.org/10.29166/revfig.v1i2.67>
- Motsi, T., Rowson, N. A., y Simmons, M. J. H. (2009). Adsorption of heavy metals from acid mine drainage by natural zeolite. *International Journal of Mineral Processing*, 92, 42–48. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2009.02.005>
- Naidu, G., Ryu, S., Thiruvkatachari, R., Choi, Y., Jeong, S., y Vigneswaran, S. (2019). A

- critical review on remediation, reuse, and resource recovery from acid mine drainage. *Environmental Pollution*, 247(1), 1110–1124. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.01.085>
- Nairn, R. W., Hedin, R. S., y Watzlaf, G. R. (1991). A Preliminary Review of the Use of Anoxic Limestone Drains in the Passive Treatment of Acid Mine Drainage. *Proceedings of the 12th Annual West Virginia Surface Mine Drainage Task Force Symposium*, 13 pages.
- Nieves, N., y Solano, A. (2017). Caracterización del drenaje ácido en la minería de esmeralda Quípama-Boyacá. *Visión electrónica*, 11(2), 318–325. <https://doi.org/10.14483/22484728.13136>
- Nuttall, C. (2000). Zinc removal from hard, circum-neutral mine waters using a novel closed-bed limestone reactor. *Water Research*, 34(4), 1262–1268. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(99\)00252-3](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(99)00252-3)
- Oliva, J., De Pablo, J., Cortina, J., Cama, J., y Ayora, C. (2010). The use of Apatite II<sup>TM</sup> to remove divalent metal ions zinc(II), lead(II), manganese(II) and iron(II) from water in passive treatment systems: Column experiments. *Journal of Hazardous Materials*, 184(1–3), 364–374. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.08.045>
- OMS. (2019). Armonización de los estándares de agua en las Américas. *Organization of American States. Department of Sustainable Development*, 73. <https://www.oas.org/dsd/publications/classifications/Armoniz.EstandaresAguaPotable.pdf>
- Rea, A. (2017). Política minera y sostenibilidad ambiental en Ecuador. *FIGEMPA: Investigación y Desarrollo*, 1(2), 41–52. <https://doi.org/10.29166/revfig.v1i2.68>
- Rezaie, B., y Anderson, A. (2020a). Sustainable resolutions for environmental threat of the acid mine drainage. *Science of the Total Environment*, 717, 137211. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137211>
- Rezaie, B., y Anderson, A. (2020b). Sustainable resolutions for environmental threat of the acid mine drainage. *The Science of the total environment*, 717, 137211. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137211>

- Rivera, M., Romero, F., Sedov, S., y Solleiro, E. (2020). Carbonatos pedogénicos para el tratamiento del drenaje ácido de mina (DAM). Experimentos de laboratorio. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 72(1), 1–16. <https://doi.org/10.18268/BSGM2020v72n1a250919>
- RoyChowdhury, A., Sarkar, D., y Datta, R. (2015). Remediation of Acid Mine Drainage-Impacted Water. En *Current Pollution Reports* (Vol. 1, Número 3, pp. 131–141). Springer. <https://doi.org/10.1007/s40726-015-0011-3>
- Salas, L. (2017). *Los conflictos socioambientales generados en el desarrollo de la actividad minera metálica y su incidencia en los derechos del buen vivir en los habitantes de la parroquia Bellamaría cantón Santa Rosa provincia de El Oro, Ecuador: 2014 - 2015*. [Universidad Técnica Particular de Loja]. [https://dspace.utpl.edu.ec/bitstream/123456789/16574/1/Salas\\_Solano\\_Luz\\_Marlene.pdf](https://dspace.utpl.edu.ec/bitstream/123456789/16574/1/Salas_Solano_Luz_Marlene.pdf)
- Sanchez, J., y Ferreyra, J. (2016). Drenajes ácidos de mina. *Revista de medio ambiente y minería*, 1(2519–5352), 20–33. [http://www.revistasbolivianas.org.bo/pdf/mamym/n1/n1\\_a03.pdf](http://www.revistasbolivianas.org.bo/pdf/mamym/n1/n1_a03.pdf)
- Skousen, J., Ziemkiewicz, P., y McDonald, L. (2019). Acid mine drainage formation, control and treatment: Approaches and strategies. *Extractive Industries and Society*, 6(1), 241–249. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2018.09.008>
- Skousen, J., Zipper, C. E., Rose, A., Ziemkiewicz, P. F., Nairn, R., McDonald, L. M., y Kleinmann, R. L. (2017). Review of Passive Systems for Acid Mine Drainage Treatment. *Mine Water and the Environment*, 36(1), 133–153. <https://doi.org/10.1007/s10230-016-0417-1>
- TULSMA. (2017). Norma de Calidad Ambiental y de descarga de efluentes : Recurso Agua. Libro VI Anexo 1. *TULAS Texto unificado de legislación secundaria del Ministerio del Ambiente*, 286–339.
- UGR. (2018). Química de las aguas naturales. *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, II, 14.
- Utami, U. B. L., Susanto, H., y Cahyono, B. (2020). Neutralization Acid Mine Drainage

- (AMD) using NaOH at PT. Jorong Barutama Grestone, Tanah Laut, South Borneo. *IJCA (Indonesian Journal of Chemical Analysis)*, 3(1), 17–21. <https://doi.org/10.20885/ijca.vol3.iss1.art3>
- Vilela, W., Espinosa, E., y Bravo, A. (2020). La contaminación ambiental ocasionada por la minería en la provincia de El Oro. *Estudios de la Gestión. Revista Internacional de Administración*, 8(8), 215–233. <https://doi.org/10.32719/25506641.2020.8.8>
- Villada, A. (2014). Documentación de los manuales para la toma de muestra de calidad del agua y vertimientos, realizados por la corporación autónoma regional de Risaralda - Carder. *Carder*, 3, 14–40. <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/handle/11059/4558/628161V712.pdf;sequence=1>
- Watzlaf, G., Schroeder, K., y Kairies, C. (2000). Long-term performance of anoxic limestone drains. *Mine Water and the Environment*, 19(2), 98–110. <https://doi.org/10.1007/bf02687258>
- Zamora, G., y Mata, J. (2017). Estudio técnico de la recuperación de un producto comerciable de Zinc mediante desulfatación, dren anóxico calizo y precipitación de las aguas ácidas de la mina de Porco. *Revista de medio ambiente minero y minería*, 2, 56–66. [http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2519-53522017000100005&lng=es&nrm=iso](http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2519-53522017000100005&lng=es&nrm=iso)
- Zevallos, J. (2016). *Estabilización del drenaje ácido de mina de la empresa Paraíso perdido Apata* [Universidad Nacional del Centro del Perú Escuela de Posgrado]. <http://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/UNCP/4587/ZevallosS..pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Zipper, Jage, y Skousen. (2014). Passive Treatment of Acid-Mine Drainage. *Virginia Tech*, 133, 1–14. <https://doi.org/10.1002/9781118749197.ch30>

## 11. Anexos

Anexo 1. Límites máximos permisibles para descargas de efluentes a cuerpos de agua dulce conforme al Acuerdo Ministerial N.º 097.

<b>Parámetros</b>	<b>Unidad</b>	<b>Límite máximo permisible</b>
Aceites y grasas	mg/l	0,3
Alkil mercurio	mg/l	No detectable
Aldehídos	mg/l	2,0
Aluminio	mg/l	5,0
Arsénico total	mg/l	0,1
Bario	mg/l	2,0
Boro total	mg/l	2,0
Cadmio	mg/l	0,02
Cianuro total	mg/l	0,1
Cloro Activo	mg/l	0,5
Cloroformo	mg/l	0,1
Cloruros	mg/l	1000
Cobre	mg/l	1,0
Cobalto	mg/l	0,5
Coliformes Fecales	Nmp/100 ml	Remoción > al 99.9%
Color real	mg/l	Inapreciable en dilución 1/20
Compuestos fenólicos	mg/l	0,2
Cromo hexavalente	mg/l	0,5
DBO	mg/l	100
DQO	mg/l	250
Dicloroetileno	mg/l	1,0
Estaño	mg/l	5,0
Fluoruros	mg/l	5,0
Fósforo total	mg/l	10,0
Hierro total	mg/l	10,0

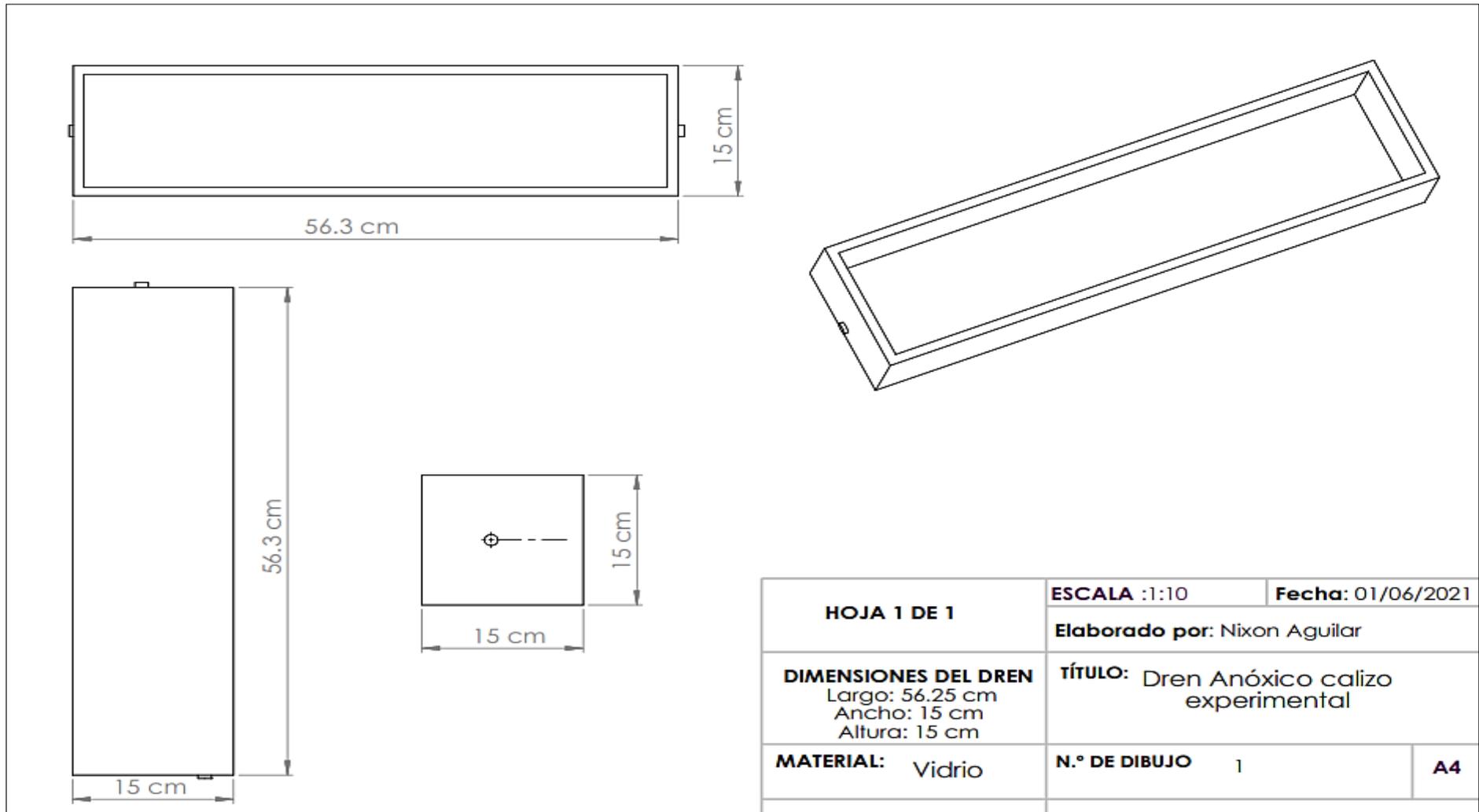
<b>Parámetros</b>	<b>Unidad</b>	<b>Límite máximo permisible</b>
Hidrocarburos	mg/l	20,0
Manganeso total	mg/l	2,0
Materia flotante	mg/l	Ausencia
Mercurio total	mg/l	0,005
Níquel	mg/l	2,0
Nitratos + nitritos	mg/l	10,0
Nitrógeno Kjeldahl	mg/l	15
Organoclorados totales	mg/l	0,05
Organofosforados totales	mg/l	0,1
Plata	mg/l	0,1
Plomo	mg/l	0,2
pH		5-9
Selenio	mg/l	0,1
Sólidos sedimentables	ml/l	1,0
Sólidos suspendidos	mg/l	100
Sólidos totales	mg/l	1600
Sulfatos	mg/l	1000
Sulfitos	mg/l	2,0
Sulfuros	mg/l	0,5
Temperatura	mg/l	< 35
Tensoactivos	mg/l	0,5
Tetracloruro de carbono	mg/l	1,0
Tricloroetileno	mg/l	1,0
Vanadio	mg/l	5,0
Zinc	mg/l	5,0

Fuente: TULSMA, 2017

Anexo 2. Registro fotográfico de la realización del experimento en el prototipo experimental del dren anóxico calizo.



Anexo 3. Diseño del prototipo experimental del dren anóxico calizo (dimensionamiento de acuerdo al ancho, largo y profundidad).



Anexo 4. Resultados del análisis de concentración de metales del DAM del crucero Nro. 4 de la mina La Veinticuatro medido in situ.



**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**  
**DEPARTAMENTO DE METALURGIA EXTRACTIVA**

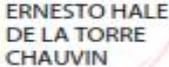


**Resultado de análisis por Espectrometría de Absorción Atómica**

**Solicitante:** Helena España  
**Referencia:** ST - 8201  
**Fecha:** 29-07-21  
**Muestra:** Una muestra de drenaje ácido de mina

La cuantificación de los metales se realizó empleando el espectrómetro de Absorción Atómica marca Perkin Elmer modelo Aanalyst 300. A continuación los resultados:

Muestra	Determinación	Resultados
Drenaje ácido de mina Cantón: Portovelo Mina Veinticuatro- Cruce R04	Cobre Hierro Plomo	4,17 mg/L 10,78 mg/L 0,15 mg/L



**ERNESTO HALE DE LA TORRE CHAUVIN**  
Ing. Ernesto de la Torre Ch. PhD.  
**Jefe de Departamento**



Firmado digitalmente por  
**EVELYN PAMELA CRIOLLO TIRADO**  
MSc. Evelyn Criollo T.  
**Jefe de Laboratorio**

Pasaje Andalucía 154 E12A y A. Mena Cantón - Telfax (593-2)2236 562 - Celular 09-9471051 Cañilla 17-01-2759  
E-mail: edclator@interactiva.net.ec - Quito-Ecuador

Fuente: EPN (2021).

Anexo 5. Análisis de medidas repetidas en el tiempo de pH y tratamiento.

(I) Horas transcurridas	(J) Horas transcurridas	Diferencia de medias (I-J)	Desv. Error	Sig. <sup>b</sup>	95% de intervalo de confianza para diferencia	
					Límite inferior	Límite superior
0	24	-3,235*	,160	<b>,002</b>	-4,235	-2,235
	48	-3,640*	,140	<b>,001</b>	-4,511	-2,769
	72	-3,992*	,180	<b>,001</b>	-5,113	-2,872
24	0	3,235*	,160	<b>,002</b>	2,235	4,235
	48	-,405*	,064	<b>,048</b>	-,803	-,007
	72	-,757*	,092	<b>,022</b>	-1,328	-,187
48	0	3,640*	,140	<b>,001</b>	2,769	4,511
	24	,405*	,064	<b>,048</b>	,007	,803
	72	-,352	,067	<b>,080</b>	-,769	,064
72	0	3,992*	,180	<b>,001</b>	2,872	5,113
	24	,757*	,092	<b>,022</b>	,187	1,328
	48	,352	,067	<b>,080</b>	-,064	,769

Se basa en medias marginales estimadas

\* La diferencia de medias es significativa en el nivel ,05.

Anexo 6. Prueba de homogeneidad de Varianzas de Mauchly de los datos de pH obtenidos en laboratorio.

Efecto intra-sujetos	W de Mauchly	Aprox. Chi-cuadrado	gl	Sig.	Greenhouse-Geisser	Épsilon <sup>b</sup> Huynh-Feldt	Límite inferior
Horas transcurridas	,144	<b>3,339</b>	5	<b>,695</b>	,507	,918	,333

b. Se puede utilizar para ajustar los grados de libertad para las pruebas promedio de significación. Las pruebas corregidas se visualizan en la tabla de pruebas de efectos intra-sujetos.

Anexo 7. Esfericidad asumida de acuerdo a los resultados obtenidos de pH en la prueba de Mauchly.

<b>Origen</b>	<b>Tipo III suma de cuadrados</b>	<b>gl</b>	<b>Media cuadrática</b>	<b>F</b>	<b>Sig.</b>	<b>Eta parcial al cuadrado</b>	<b>Parámetro sin centralidad</b>	<b>Potencia observada</b>
Esfericidad asumida	40,517	3	13,506	<b>428,439</b>	<b>,000</b>	<b>,993</b>	1285,318	1,000

Anexo 8. Medias y desviaciones estándar del pH del DAM tratado y DAM sin tratar obtenidas con el analizador portátil (n=4).

<b>Tiempo (horas)</b>	<b>pH</b>	
	<b>Drenaje ácido de mina sin tratar (DST) (n=4)</b>	<b>Drenaje ácido de mina tratado (DT) (n=4)</b>
0 h	2,91 (0,093)	2,93 (0,081)
24 h	2,89 (0,048)	5,96 (0,208)
48 h	2,94 (0,071)	6,42 (0,211)
72 h	3,00 (0,031)	6,76 (0,255)
96 h	2,99 (0,040)	7,02 (0,232)
120 h	2,98 (0,047)	7,17 (0,028)
144 h	2,97 (0,066)	7,28 (0,269)
168 h	2,93 (0,022)	7,29 (0,277)
192 h	2,96 (0,028)	7,32 (0,281)
216 h	2,98 (0,052)	7,32 (0,280)
240 h	2,99 (0,046)	7,43 (0,279)

Desviación estándar expresada entre paréntesis.

Anexo 9. Análisis de medidas repetidas en el tiempo de conductividad eléctrica y tratamiento.

(I) Horas transcurridas	(J) Horas transcurridas	Diferencia de medias (I-J)	Desv. Error	Sig. <sup>b</sup>	95% de intervalo de confianza para diferencia	
					Límite inferior	Límite superior
0	24	406,250*	22,122	<b>,002</b>	268,394	544,106
	48	395,250*	11,586	<b>,000</b>	323,053	467,447
	72	393,250*	18,140	<b>,001</b>	280,209	506,291
24	0	-406,250*	22,122	<b>,002</b>	-544,106	-268,394
	48	-11,000	15,631	<b>1,000</b>	-108,406	86,406
	72	-13,000	4,761	<b>,431</b>	-42,668	16,668
48	0	-395,250*	11,586	<b>,000</b>	-467,447	-323,053
	24	11,000	15,631	<b>1,000</b>	-86,406	108,406
	72	-2,000	13,279	<b>1,000</b>	-84,749	80,749
72	0	-393,250*	18,140	<b>,001</b>	-506,291	-280,209
	24	13,000	4,761	<b>,431</b>	-16,668	42,668
	48	2,000	13,279	<b>1,000</b>	-80,749	84,749

Se basa en medias marginales estimadas

\*. La diferencia de medias es significativa en el nivel ,05.

b. Ajuste para varias comparaciones: Bonferroni.

Anexo 10. Prueba de homogeneidad de Varianzas de Mauchly de los datos de conductividad eléctrica obtenidos en laboratorio.

Efecto intra-sujetos	W de Mauchly	Aprox. Chi-cuadrado	gl	Sig.	Épsilon <sup>b</sup>		
					Greenhouse-Geisser	Huynh-Feldt	Límite inferior
Horas transcurridas	,017	<b>6,984</b>		<b>,286</b>	,441	,655	,333

a. Diseño: Intersección Diseño intra-sujetos: Horas transcurridas

b. Se puede utilizar para ajustar los grados de libertad para las pruebas promedio de significación. Las pruebas corregidas se visualizan en la tabla de pruebas de efectos intra-sujetos

Anexo 11. Esfericidad asumida de acuerdo a los resultados obtenidos de conductividad eléctrica en la prueba de Mauchly.

Origen		Tipo III de suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.	Eta parcial al cuadrado	Parámetro sin centralidad	Potencia observada <sup>a</sup>
Horas transcurridas	Esfericidad asumida	476201,18	3	158733,72	341,11	,000	,991	1023,34	1,000
	Greenhouse-Geisser	476201,18	1,32	359866,69	341,11	,000	,991	451,385	1,000

a. Se ha calculado utilizando Alpha = ,05

Anexo 12. Medias y desviaciones estándar de conductividad eléctrica del DAM tratado y DAM sin tratar obtenidas con el analizador portátil (n=4).

Tiempo (Horas)	Conductividad eléctrica (uS/cm)	
	Drenaje ácido de mina sin tratar (DST)	Drenaje ácido de mina tratado (DT)
0 h	2525,0 (17,3)	2571,5 (20,6)
24 h	2515,0 (20,8)	2010,0 (133,2)
48 h	2545,0 (34,2)	2085,0 (54,5)
72 h	2577,5 (12,6)	2125,0 (34,2)
96 h	2595,0 (17,3)	2140,0 (27,1)
120 h	2597,5 (28,7)	2152,5 (5,00)
144 h	2610,0 (14,1)	2150,0 (16,3)
168 h	2637,0 (5,00)	2172,5 (26,3)
192 h	2670,0 (14,1)	2175,0 (46,5)
216 h	2660,0 (29,4)	2150,0 (113,7)
240 h	2682,5 (22,2)	2060,0 (58,9)

Desviación estándar expresada entre paréntesis.

Anexo 13. Prueba de homogeneidad de Varianzas de Mauchly de los datos de alcalinidad obtenidos en laboratorio.

Efecto intra-sujetos	W de Mauchly	Aprox. Chi-cuadrado	gl	Sig.	Épsilon <sup>b</sup>		
					Greenhouse-Geisser	Huynh-Feldt	Límite inferior
Horas transcurridas	,003	<b>10,149</b>	5	<b>,113</b>	,349	,374	,333

Prueba la hipótesis nula de que la matriz de covarianzas de error de las variables dependientes con transformación orto normalizada es proporcional a una matriz de identidad.

a. Diseño: Intersección

Diseño intra-sujetos: Horas\_transcurridas

b. Se puede utilizar para ajustar los grados de libertad para las pruebas promedio de significación. Las pruebas corregidas se visualizan en la tabla de pruebas de efectos intra-sujetos.

Anexo 14. Esfericidad asumida de acuerdo a los resultados obtenidos de alcalinidad en la prueba de Mauchly.

Origen		Tipo III de suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.	Eta parcial al cuadrado	Parámetro sin centralidad	Potencia observada <sup>a</sup>
Horas transcurridas	Esfericidad asumida	4,750	3	1,583	<b>,115</b>	<b>,949</b>	,037	,344	,064
	Greenhouse-Geisser	4,750	1,047	4,535	,115	,767	,037	,120	,057

a. Se ha calculado utilizando Alpha igual a 0,05

Anexo 15. Análisis de medidas repetidas en el tiempo de alcalinidad y tratamiento.

(I) Horas transcurridas	(J) Horas transcurridas	Diferencia de medias (I-J)	Desv. Error	Sig. <sup>b</sup>	95% de intervalo de confianza para diferencia <sup>b</sup>	
					Límite inferior	Límite superior
	48	1,000	1,291	<b>1,000</b>	-7,045	9,045
24	72	,000	3,559	<b>1,000</b>	-22,178	22,178
	96	-,500	3,775	<b>1,000</b>	-24,024	23,024
	24	-1,000	1,291	<b>1,000</b>	-9,045	7,045
48	72	-1,000	2,380	<b>1,000</b>	-15,834	13,834
	96	-1,500	2,630	<b>1,000</b>	-17,889	14,889
	24	,000	3,559	<b>1,000</b>	-22,178	22,178
72	48	1,000	2,380	<b>1,000</b>	-13,834	15,834
	96	-,500	,500	<b>1,000</b>	-3,616	2,616
	24	-,500	3,775	<b>1,000</b>	-23,024	24,024
96	48	1,500	2,630	<b>1,000</b>	-14,889	17,889
	72	,500	,500	<b>1,000</b>	-2,616	3,616

Se basa en medias marginales estimadas

\*. La diferencia de medias es significativa en el nivel ,05.

b. Ajuste para varias comparaciones: Bonferroni

Anexo 16. Resultados del análisis de concentración de metales del DAM tratado después de 24 horas.

	<b>ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL</b> <b>DEPARTAMENTO DE METALURGIA EXTRACTIVA</b>	
<b>Resultado de análisis por Espectrometría de Absorción Atómica</b>		
<b>Solicitante:</b> <b>Referencia</b> <b>Fecha:</b> <b>Muestra:</b>	<b>Helena España</b> ST- 8281 13-01-21 Una muestra líquida de drenaje ácido	
<p>La cuantificación de los metales se lo realizó empleando el espectrómetro de Absorción Atómica marca Perkin Elmer modelo Aanalyst 300. A continuación los resultados:</p>		
<b>Muestra</b>	<b>Determinación</b>	<b>Resultados</b>
Nixon Aguilar Botellas 4,6,7,8	Cobre Hierro Plomo	1,20 mg/L 2,59 mg/L 0,06 mg/L
<b>ERNESTO HALE DE LA TORRE CHAUVIN</b> <small>Firmado digitalmente por ERNESTO HALE DE LA TORRE CHAUVIN            Fecha: 2022.01.18 12:12:35 -05'00'</small> <b>Ing. Ernesto de la Torre Ch. PhD.</b> <b>Jefe de Departamento</b>	 <small>Firmado electrónicamente por:</small> <b>EVELYN PAMELA CRIOLLO TIRADO</b> <b>MSc. Evelyn Criollo T.</b> <b>Jefe de Laboratorio</b>	

Fuente: EPN (2021).

## CERTIFICACIÓN

Piñas, 10 de mayo del 2022

Lic. Bety Del Carmen Valarezo Espinoza, Mg. Sc.

**DOCENTE DE LA CÁTEDRA DE INGLÉS EN EL COLEGIO DE BACHILLERATO 8 DE NOVIEMBRE.**

### CERTIFICO

Que la traducción del documento adjunto por el señor **Nixon José Aguilar Valarezo**, con número de cédula **0750598112**, cuyo tema de investigación se titula **“Propuesta de un tratamiento pasivo de DAM en base a un prototipo de dren anóxico calizo en el Crucero Nro. 4 de la mina La Veinticuatro, cantón Portovelo”**, ha sido realizada por Lic. Bety Del Carmen Valarezo Espinoza, Mg.Sc. Docente del Colegio de Bachillerato 8 de Noviembre.

Esta es una traducción textual del documento adjunto.

Lo certifico en honor a la verdad, facultando al portador del presente documento, hacer el uso legal del pertinente.

Atentamente.-



Lic. Bety Del Carmen Valarezo Espinoza, Mg.Sc

C.I. 0703382390

Correo electrónico: bety.valarezo@educacion.gob.ec

**DOCENTE DE LA CÁTEDRA DE INGLÉS**