

Diagnóstico de los pasivos ambientales mineros producto de la extracción de oro aluvial en el municipio de Barranco de Loba, Bolívar

Msc. Luis Carlos Araujo Medina¹  

Posdoc. Nelly Yolanda Céspedes Guevara²  

Msc. Ramiro Carlos Almanza Gloria³  

PhD. Luis Carlos Díaz Muegue⁴  

Recibido: 15/03/2025 Aceptado: 20/07/2025 Actualizado: 16/12/2025

DOI: 10.17151/luaz.2025.61.5

Resumen

En Colombia el problema de los pasivos ambientales mineros (PAM) responde, en gran medida, a la informalidad en la explotación de recursos, la falta de control sobre las actividades mineras y la ausencia de gobernabilidad en ciertas regiones (Contraloría General de la República, 2021). En el área de estudio la degradación ambiental ocasionada por la minería aurífera aluvial representa una amenaza para los ecosistemas y la salud de las comunidades locales. La acumulación de metales pesados, la erosión del suelo y la contaminación de fuentes hídricas evidencian la necesidad de identificar y caracterizar los PAM, además de implementar estrategias de mitigación efectivas que permitan restaurar las áreas afectadas. El estudio sigue un enfoque cuantitativo fundamentado en la recolección y análisis de datos numéricos obtenidos mediante muestreo sistemático, con un diseño metodológico no experimental de tipo descriptivo sin manipulación de variables. La investigación se estructuró en tres fases, en la primera se caracterizaron las áreas de extracción abandonadas, en la segunda se estableció una metodología para la identificación y evaluación de los PAM en el área de estudio, y finalmente, se propusieron soluciones basadas en la naturaleza (SbN) para la rehabilitación de las áreas afectadas. Los resultados obtenidos indican que, en el agua, las concentraciones de cianuro, mercurio y plomo están por debajo de los límites peligrosos, sugiriendo bajos niveles de contaminación. Sin embargo, en el suelo, los niveles de plomo superan el umbral aceptable, lo que evidencia una contaminación significativa. La restauración de los ecosistemas degradados a través de las soluciones basadas en la naturaleza (SbN) se constituye en una alternativa viable en la región. El presente trabajo tiene como objetivo caracterizar las áreas con indicios de PAM producto de la extracción de oro aluvial en el corregimiento Minas de Santa

Cruz, departamento de Bolívar, evaluar los pasivos ambientales mineros hallados y la propuesta de soluciones basadas en la naturaleza que promuevan un desarrollo sostenible en la región.

Palabras clave: degradación del suelo, degradación hídrica, minería de oro aluvial, pasivos ambientales (fuente: *Tesaurus AGROVOC*).

Diagnosis of mining environmental liabilities resulting from alluvial gold extraction in the municipality of Barranco de Loba, Bolívar

Abstract

In Colombia, the issue of mining environmental liabilities (MELs) largely stems from informal resource extraction, the lack of oversight of mining activities, and the absence of effective governance in certain regions (Contraloría General de la República, 2021). Within the study area, the environmental degradation caused by alluvial gold mining poses a threat to local ecosystems and to the health of nearby communities. The accumulation of heavy metals, soil erosion, and the contamination of water sources highlight the need to identify and characterize MELs, as well as to implement effective mitigation strategies that enable the restoration of affected areas.

The study adopts a quantitative approach based on the collection and analysis of numerical data obtained through systematic sampling, using a non-experimental, descriptive methodological design without variable manipulation. The research was structured into three phases: the first involved characterizing abandoned extraction areas; the second established a methodology for the identification and assessment of MELs in the study zone; and the third proposed nature-based solutions (NbS) for the rehabilitation of degraded areas.

The results show that, in water, cyanide, mercury, and lead concentrations are below hazardous thresholds, suggesting low levels of contamination. However, in soil, lead levels exceed the acceptable limit, indicating significant pollution. The restoration of degraded ecosystems through nature-based solutions (NbS) constitutes a viable alternative in the region.

This paper aims to characterize areas showing evidence of MELs resulting from alluvial gold extraction in the district of Minas de Santa Cruz, Bolívar Department, to assess the mining environmental liabilities identified, and to present nature-based solution proposals that foster sustainable development in the region.

Keywords: soil degradation, water degradation, alluvial gold mining, environmental liabilities (source: *AGROVOC Thesaurus*).

Introducción

En Colombia la normativa sobre los pasivos ambientales mineros (PAM) es inexistente o casi nula por lo que no es común encontrar una definición y definir una metodología adecuada para la gestión de éstos. En general, los pasivos ambientales mineros (PAM) se relacionan con la pérdida de un bien o un servicio, o con el deterioro de las condiciones ambientales de un territorio en el que se ha realizado una actividad minera (Chia, Pinto, 2020). Los pasivos ambientales mineros (PAM) son impactos negativos derivados de las actividades mineras, que pueden perdurar mucho tiempo después de la finalización de las operaciones. Estos impactos incluyen desde la contaminación del agua y el suelo hasta la alteración irreversible del paisaje. Los pasivos no solo afectan el medio ambiente, sino también la calidad de vida de las comunidades (González, 2021), generando problemas de salud pública y pérdida de acceso a recursos naturales esenciales. En las regiones afectadas por minería con incumplimiento de normativas, la magnitud de los pasivos ambientales mineros (PAM) aumenta significativamente.

Los pasivos ambientales mineros (PAM) asociados a la minería, especialmente en regiones como el corregimiento de Minas de Santa Cruz en el departamento de Bolívar, incluyen la contaminación del agua, la deforestación y la degradación del suelo, afectando directamente los ecosistemas y las comunidades locales (Méndez y Silva, 2022), y responden, en gran medida, a la informalidad en la explotación de recursos, la falta de control sobre las actividades mineras y la ausencia de gobernabilidad en ciertas regiones (Contraloría General de la República, 2021). La recuperación de estas áreas en ocasiones no solo requiere grandes inversiones económicas, sino también un enfoque interdisciplinario que abarque tanto la remediación ambiental como la rehabilitación social de las comunidades afectadas.

El corregimiento de Minas de Santa Cruz se caracteriza por su vocación agropecuaria y minera, con un alto potencial para el desarrollo de proyectos auríferos. La economía local se sustenta en actividades como la pesca, la agricultura, la ganadería y la minería artesanal ancestral (Gobernación de Bolívar, 2024). La explotación aurífera aluvial ha generado impactos ambientales severos, entre ellos la contaminación de fuentes hídricas con mercurio y metales pesados, la degradación del suelo

y la pérdida de biodiversidad. La degradación ambiental ocasionada por la minería aurífera aluvial en el área de estudio representa una amenaza para los ecosistemas y la salud de las comunidades locales. La acumulación de metales pesados, la erosión del suelo y la contaminación de fuentes hídricas evidencian la necesidad de implementar estrategias de mitigación efectivas que permitan restaurar las áreas afectadas.

El uso de mercurio es frecuente en la minería aurífera aluvial, lo que contribuye a la liberación de este metal pesado en los ecosistemas acuáticos (Rodríguez & García, 2022), afectando gravemente a los cuerpos de agua y a la fauna que depende de ellos. El mercurio se amalgama con el oro durante el proceso de extracción, pero gran parte de este metal termina siendo liberado al ambiente sin ningún control, generando efectos tóxicos a largo plazo. El mercurio es altamente persistente en los ecosistemas y puede bioacumularse en la cadena alimentaria, afectando tanto a la fauna como a las comunidades que dependen de los recursos naturales.

A nivel nacional, los pasivos ambientales mineros (PAM) representan un desafío crítico debido a la falta de estrategias integradas para su identificación y recuperación. Si bien existen iniciativas normativas y gubernamentales, como el Pacto por la Sostenibilidad, que busca equilibrar la conservación ambiental con la producción económica (Ruiz Ortiz et al., 2024), su aplicación presenta limitaciones tanto en la identificación como en la evaluación y recuperación de estos pasivos ambientales. Por ello, resulta crucial desarrollar metodologías innovadoras basadas en enfoques sostenibles que favorezcan la restauración de los ecosistemas degradados por la minería.

La gestión de los pasivos ambientales mineros debe ser una prioridad para mitigar los impactos de la minería (Gutiérrez y Fernández, 2021), por lo que la investigación se desarrolló en tres fases, una primera en la que se caracterizaron las áreas de extracción abandonadas, en la segunda se estableció una metodología para la identificación y evaluación de los pasivos ambientales mineros (PAM) en el área de estudio, y finalmente, en la tercera fase se propusieron soluciones basadas en la naturaleza (SbN) para la rehabilitación de las áreas afectadas. Esta investigación tiene como objetivo caracterizar las áreas con indicios de los pasivos ambientales mineros (PAM) producto de la extracción de oro aluvial en el corregimiento Minas de Santa Cruz, departamento de Bolívar, evaluar los pasivos ambientales mineros hallados y la propuesta de soluciones basadas en la naturaleza que promuevan un desarrollo sostenible en la región.

Materiales y métodos

El presente estudio sigue un enfoque cuantitativo, puesto que se fundamenta en la recolección y el análisis de datos numéricos obtenidos mediante muestreo sistemático. De acuerdo con Creswell y Clark (2017), la investigación cuantitativa se caracteriza por la medición objetiva de variables, el uso de instrumentos estandarizados y el análisis estadístico de los datos. Asimismo, Hernández Sampieri et al. (2018) destacan que este tipo de enfoque permite identificar patrones y tendencias en fenómenos observables.

El diseño metodológico es no experimental y de tipo descriptivo, dado que no se manipulan variables, sino que se analizan condiciones existentes en las áreas afectadas por la minería aluvial. La investigación se estructura en tres fases y contempla como primera medida un muestreo sistemático al interior del área definida por las coordenadas mostradas en la [Tabla 1](#), basado en factores asociados a la minería y su estado de abandono. Para ello, se seleccionaron tres puntos de muestreo en suelos y cuerpos de agua, ubicados a profundidades entre 0 y 50 cm, con el propósito de caracterizar los pasivos ambientales mineros (PAM) y su impacto en el entorno.

Tabla 1. *Coordenadas Magna Sirgas WKID:4686 de los puntos de muestreo*

ID	Descripción	Coordenadas	
		Latitud	Longitud
M1	Puntos de Muestreo	8.705395	-74.205078
M2		8.715269	-74.20117
M3		8.708920	-74.203552

Fuente: elaboración propia a partir de MAGNA SIRGAS

WKID:4686 (sistema de referencia geodésico utilizado en Colombia).

Las muestras de suelo se tomaron a profundidades entre 0 y 50 cm, mientras que las muestras de agua se obtuvieron de cuerpos hídricos cercanos a las zonas mineras abandonadas. Estas muestras fueron sometidas a análisis fisicoquímicos y geoquímicos con el objetivo de caracterizar los pasivos ambientales mineros (PAM) en los componentes suelo y agua y evaluar su impacto a nivel local, en términos de contaminación con metales pesados, principalmente mercurio, cianuro y plomo, compuestos utilizados comúnmente en la región para la extracción de oro aluvial.

El presente estudio emplea un muestreo sistemático estratificado, el cual, según Hernández Sampieri et al. (2018), se utiliza cuando la población de estudio presenta heterogeneidad y se requiere dividirla en subgrupos o estratos con características similares. En este caso, los estratos fueron definidos con base en las condiciones ambientales y el grado de afectación por actividades mineras. Posteriormente, dentro de cada estrato, los puntos de muestreo se seleccionaron de manera sistemática para garantizar una cobertura representativa del área de estudio, teniendo en cuenta las posibilidades de acceso a dichos puntos.

El proceso de muestreo se llevó a cabo en julio de 2024, considerando que para esa fecha las condiciones climáticas eran favorables, particularmente por la ausencia de precipitaciones, las cuales, en caso de estar presentes, pueden influir en la dispersión de los contaminantes y en la alteración de los resultados para las muestras de suelo y agua. Según Creswell y Plano Clark (2018), el muestreo sistemático es una estrategia efectiva en estudios cuantitativos, debido a que permite obtener datos confiables y reducir sesgos en la selección de las muestras.

El desarrollo metodológico estuvo centrado en la aplicación de 3 fases que proporcionaron la información necesaria para la caracterización de las áreas de estudio, la identificación y evaluación de los pasivos ambientales mineros (PAM) y la propuesta de solución a la problemática basada en la rehabilitación de las zonas afectadas. La descripción de las fases se presenta a continuación:

Fase 1: caracterización de áreas de extracción abandonadas

En esta fase, se utilizó un enfoque geoespacial mediante ArcGIS para identificar y caracterizar las áreas afectadas por la minería aluvial en el corregimiento de Minas de Santa Cruz. Los pasos específicos incluyen:

Análisis de imágenes satelitales y datos geoespaciales: se utilizaron imágenes satelitales históricas para identificar los cambios en el uso del suelo a lo largo del tiempo y determinar los puntos con vestigios de minería abandonada. Estos puntos se identifican en la [Tabla 2](#) y son los que definen el área de estudio.

Generación de mapas temáticos: se crearon capas geográficas que muestran la extensión del área de estudio y los sitios con minería en estado de abandono, así como los cuerpos de agua y los suelos erosionados. Estas capas fueron superpuestas con información topográfica para resaltar las áreas más afectadas.

Tabla 2. *Coordenadas Magna Sirgas WKID:4686 de los puntos de control en campo*

ID	Descripción	Coordenadas	
		Latitud	Longitud
1	Puntos de Control	8.71800	-74.20575
2		8.71522	-74.20077
3		8.70956	-74.20312
4		8.70724	-74.20408
5		8.70517	-74.20494
6		8.70640	-74.20924
7		8.70975	-74.20887
8		8.71377	-74.20642
9		8.70968	-74.20460
10		8.70731	-74.20480

Fuente: elaboración propia a partir de MAGNA SIRGAS

WKID:4686 (sistema de referencia geodésico utilizado en Colombia).

Fase 2: Metodología para la identificación y evaluación de los pasivos ambientales mineros

La metodología para la identificación y evaluación de pasivos ambientales mineros se basa en un enfoque integral que busca identificar, caracterizar y priorizar los impactos ambientales derivados de actividades mineras abandonadas. Este proceso involucra la realización de estudios de campo para identificar sitios contaminados y el análisis de los riesgos para la salud humana y el medio ambiente. La metodología incluye el análisis de los tipos de contaminantes presentes, su dispersión y la determinación de las medidas correctivas necesarias. Fuentes de esta metodología son el marco normativo ambiental local, como la Ley 99 de 1993 en Colombia y la guía internacional de la Agencia de Protección Ambiental de EE. UU. (EPA), que establece procedimientos para la identificación y remediación de pasivos ambientales.

En esta fase, se desarrolló una metodología para la identificación y evaluación de los pasivos ambientales mineros (PAM) utilizando ArcGIS y herramientas de evaluación ambiental. Los pasos principales incluyen:

Integración de datos geoespaciales: se emplearon las coordenadas geográficas obtenidas durante el muestreo para crear una base de datos geoespaciales que facilite la visualización de los puntos afectados.

Evaluación multicriterio: se aplicó un análisis multicriterio en ArcGIS para evaluar el estado de los suelos y cuerpos de agua, considerando factores como la concentración de contaminantes, el nivel de erosión y las alteraciones de la cobertura vegetal.

Clasificación de los niveles de impacto: utilizando herramientas de modelado espacial, se generaron mapas que clasifican los niveles de afectación ambiental –bajo, medio, alto– en los diferentes sitios mineros inactivos, a partir de los resultados de laboratorio. Estos mapas serán utilizados para priorizar áreas de rehabilitación.

Fase 3: propuesta de soluciones basadas en la naturaleza para la rehabilitación de áreas afectadas

Una vez identificadas las áreas más afectadas, se formuló una propuesta de estrategias de rehabilitación mediante la aplicación de soluciones basadas en la naturaleza (SbN), con las que se restaurarían los ecosistemas degradados aprovechando los procesos naturales. La metodología para la formulación de la propuesta de las estrategias incluye:

Reforestación y restauración ecológica: se propusieron técnicas de reforestación utilizando especies nativas que pueden mejorar la calidad del suelo y la biodiversidad.

Restauración de cuerpos de agua: se plantearon medidas para restaurar los cuerpos de agua contaminados, como la creación de humedales artificiales y el uso de plantas acuáticas que actúan como filtros naturales para la remediación de metales pesados.

Control de la erosión: se incluyen técnicas de bioingeniería para estabilizar los suelos erosionados, utilizando estructuras vivas como barreras vegetales que previenen el deslizamiento y la pérdida de suelo.

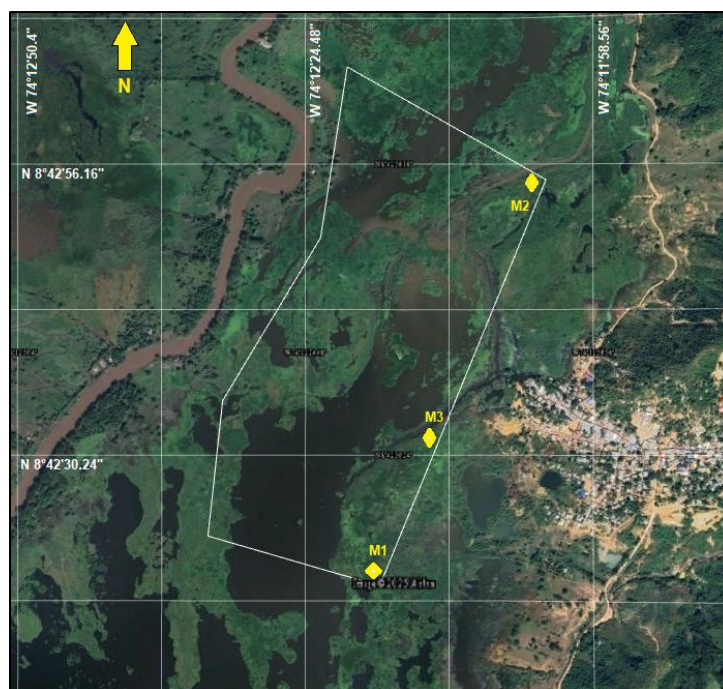
Resultados

El área de estudio se localiza en el municipio de Barranco de Loba, al sur del departamento de Bolívar, en el corregimiento Minas de Santa Cruz, una región con un clima predominantemente cálido, con temperaturas promedio de 37°C, que alterna entre períodos húmedos y secos. La zona

ha sido históricamente explotada por la minería de oro aluvial, lo que ha ocasionado un notable deterioro ambiental, dejando áreas abandonadas que presentan pasivos ambientales. La [Figura 1](#) muestra la ubicación del área de estudio y la ubicación de los tres puntos de muestreo, al costado occidental del corregimiento, destacando su proximidad al Río Magdalena, uno de los principales cuerpos de agua de la región.

Las coordenadas de los puntos de control en campo, donde se identificaron vestigios de explotaciones mineras antiguas y abandonadas fueron registradas utilizando el sistema Magnas Sirgas WKID: 4686, como se muestra en la [Tabla 2](#), lo que permitió su incorporación en herramientas de análisis geoespacial como ArcGIS para su análisis y caracterización.

Figura 1. Ubicación geoespacial del área de estudio en Barranco de Loba, Bolívar



Fuente: elaboración propia.

El área mostrada en el mapa representa la zona de estudio, la cual enmarca los sitios de explotación minera abandonada y los componentes ambientales que posiblemente se pudieran ver impactados por esta actividad. Las áreas circundantes, como las ciénagas El Mico y El Tigre, junto con los cuerpos de agua cercanos, han sido afectadas por la presencia de metales pesados como mercurio y plomo, así como el uso de cianuro en los procesos de extracción.

Las [Tablas 3 a 8](#) presentan los resultados de los análisis fisicoquímicos realizados a las muestras de agua y suelo tomadas en el área de estudio, específicamente para la detección de contaminantes como el cianuro total, mercurio y plomo. Los métodos utilizados para los análisis son reconocidos internacionalmente, siguiendo estándares establecidos por ASTM, EPA y SM.

La [Tabla 3](#) muestra los resultados del análisis fisicoquímico de contaminantes en la muestra de agua M1. El análisis de cianuro total mostró un resultado inferior al límite de cuantificación de 0,0100 mg/L, lo que indica que el cianuro presente en la muestra de agua está por debajo del umbral detectado, lo cual es positivo desde el punto de vista ambiental. En cuanto al mercurio total, el valor obtenido fue menor a 0,00050 mg/L, sugiriendo que los niveles de mercurio en el agua son mínimos y no alcanzan niveles peligrosos según los límites establecidos. Finalmente, el análisis de plomo reveló una concentración inferior a 0,0100 mg/L, lo que indica que la cantidad de este metal pesado es muy baja, lo cual es favorable para la salud humana y el ecosistema local.

Tabla 3. Resultados del análisis fisicoquímico para la muestra de agua M1

Fisicoquímico					
Análisis	Método – Técnica	LCM	Fecha de análisis	Resultado	Incertidumbre del ensayo
Cianuro Total mg CN-/L (S)	ASTM D7511	0,0100	2024/07/04	<0,0100	-
Mercurio Total mg/L (A)	EPA 7473, 2007 – Analizador Directo de Mercurio	0,00050	2024/07/02	<0,00050	-
Plomo mg/L (A)	SM 3030 K / SM 3111 B - Espectro métrico	0,0100	2024/07/02	<0,0100	-

Fuente: elaboración propia.

La [Tabla 4](#) muestra los resultados del análisis fisicoquímico de contaminantes en la muestra de agua M2. El análisis de cianuro total, realizado según el método ASTM D7511, reveló un resultado inferior al límite de cuantificación de 0,0100 mg/L, indicando que la concentración de cianuro en el agua es baja. Para el mercurio total, el método EPA 7473, 2007 reveló un resultado inferior a 0,00050 mg/L, lo cual sugiere niveles muy bajos de este contaminante en el agua. En el caso del plomo, el análisis utilizando espectrometría de absorción atómica (SM 3030 K / SM 3111 B) también mostró un valor

inferior al límite de cuantificación de 0,0100 mg/L, lo que indica que la presencia de este metal pesado es mínima, indicando una mayor calidad ambiental y seguridad para la salud, lo cual también es favorable para la salud humana y el ecosistema local.

Tabla 4. Resultados del análisis fisicoquímico para la muestra de agua M2

Fisicoquímico					
Análisis	Método – Técnica	LCM	Fecha de análisis	Resultado	Incertidumbre del ensayo
Cianuro Total mg CN-/L (S)	ASTM D7511	0,0100	2024/07/04	<0,0100	-
Mercurio Total mg/L (A)	EPA 7473, 2007 – Analizador Directo de Mercurio	0,00050	2024/07/02	<0,00050	-
Plomo mg/L (A)	SM 3030 K / SM 3111 B - Espectro métrico	0,0100	2024/07/02	<0,0100	-

Fuente: elaboración propia.

La [Tabla 5](#) muestra los resultados del análisis fisicoquímico de contaminantes en la muestra de agua M3. El análisis de cianuro total, realizado según el método Kit Chemetrics K-3803 – Espectrofotometría, reveló un resultado inferior al límite de cuantificación de 0,010 mg/L, indicando que la concentración de cianuro en el agua es baja. Para el mercurio total, el método EPA 7473, 2007 reveló un resultado inferior a 0,00050 mg/L, lo cual sugiere niveles muy bajos de este contaminante en el agua. En el caso del plomo, el análisis utilizando espectrometría de absorción atómica (SM 3030 K / SM 3111 B) también mostró un valor inferior al límite de cuantificación de 0,0100 mg/L, lo que indica que la presencia de este metal pesado es mínima, indicando una mayor calidad ambiental y seguridad para la salud.

Tabla 5. Resultados del análisis fisicoquímico para la muestra de agua M3

Fisicoquímico					
Análisis	Método – Técnica	LCM	Fecha de análisis	Resultado	Incertidumbre del ensayo

Cianuro Total mg CN-/L (S)	Kit Chemetrics K- 3803 – Rev. 18 enero 2023 – Espectrofotometría	0,010	2024/08/23	<0,010	-
Mercurio Total mg/L (A)	EPA 7473, 2007 – Analizador Directo de Mercurio	0,00050	2024/09/09	<0,00050	-
Plomo mg/L (A)	SM 3030 K / SM 3111 B - Espectro métrico	0,0100	2024/08/31	<0,0100	-

Fuente: elaboración propia.

En las tres muestras de agua analizadas y cuyos resultados se muestran en las Tablas 3, 4 y 5, se evidencia que la concentración de cianuro se encuentra por debajo del límite de cuantificación (<0,0100 mg/L). Esto indica que no hay una contaminación significativa por cianuro en las fuentes hídricas muestreadas. Sin embargo, aunque los niveles detectados sean bajos, la toxicidad del cianuro en sistemas acuáticos depende de factores como la bioacumulación y la interacción con otros elementos químicos. También, se identifica que en las tres muestras hay concentraciones de mercurio que están por debajo del límite de cuantificación (<0,00050 mg/L). Este resultado sugiere que no hay una contaminación relevante por mercurio en las fuentes de agua analizadas. No obstante, el mercurio es un metal altamente tóxico que puede encontrarse en el sedimento del fondo de los cuerpos de agua, por lo que es importante evaluar su presencia en sedimentos para obtener un panorama más completo. Finalmente, se aprecia que en todas las muestras analizadas, el plomo también se encuentra por debajo del límite de cuantificación (<0,0100 mg/L). Aunque estos valores están dentro de los estándares aceptables, es clave continuar con el monitoreo, ya que la contaminación por plomo puede aumentar con el tiempo si las fuentes de contaminación persisten.

Por otro lado, la [Tabla 6](#) muestra los resultados del análisis fisicoquímico de contaminantes en la muestra de Suelo M1. El análisis de mercurio total, el método EPA 7473, 2007 reveló un resultado superior a 0,00020 mg/kg, lo cual sugiere niveles muy altos de este contaminante en el suelo. En el caso del plomo, el análisis utilizando espectrometría de absorción atómica (SM 3050 B / SM 3111 B) también mostró un valor superior al límite de cuantificación de 20,0 mg/kg, lo que indica que la presencia de este metal pesado es alta, mostrando en esta ocasión un deterioro de la calidad ambiental y poca seguridad para la salud.

Tabla 6. Resultados del análisis fisicoquímico para la muestra de suelo M1

Fisicoquímico					
Análisis	Método – Técnica	LCM	Fecha de análisis	Resultado	Incertidumbre del ensayo
Mercurio Total mg/kg ss	EPA 7473, 2007 – Analizador Directo de Mercurio	0,0020	2024/09/02	0,100	-
Plomo mg/kg ss (S)	SM 3050 B / SM 3111 B – Absorción Atómica	20,0	2024/09/04	>100	-

Fuente: elaboración propia.

Por otro lado, en la [Tabla 7](#), se identifica que para el análisis de mercurio total en la muestra de suelo M2 se mostró un resultado inferior al límite de detección de 0,0020 mg/kg, lo que indica que los niveles de mercurio son muy bajos y no representan un riesgo significativo para el medio ambiente ni para la salud. Sin embargo, el análisis de plomo reveló un valor superior al umbral de 100 mg/kg, lo que sugiere una concentración elevada de este metal pesado, indicando una contaminación considerable y con un riesgo potencial tanto para la salud humana como para el ecosistema local.

Tabla 7. Resultados del análisis fisicoquímico para la muestra de suelo M2

Fisicoquímico					
Análisis	Método – Técnica	LCM	Fecha de análisis	Resultado	Incertidumbre del ensayo
Mercurio Total mg/kg ss	EPA 7473, 2007 – Analizador Directo de Mercurio	0,0020	2024/07/26	<0,0020	-
Plomo mg/kg ss (S)	SM 3030 K / SM 3111 B – Absorción Atómica	20,0	2024/07/10	>100	-

Fuente: elaboración propia.

En la [Tabla 8](#) vemos que para el análisis de mercurio total en la muestra de suelo M3 mostró un valor de 0,070 mg/kg, que excede el límite de detección de 0,0020 mg/kg. Este resultado indica que los niveles de mercurio en esta muestra son significativamente más altos, lo que podría representar

un riesgo para el medio ambiente y la salud. Por otro lado, el análisis de plomo arrojó un valor superior al umbral de 100 mg/kg, lo que muestra una alta concentración de este metal pesado y potencialmente una contaminación preocupante para la salud humana y el ecosistema.

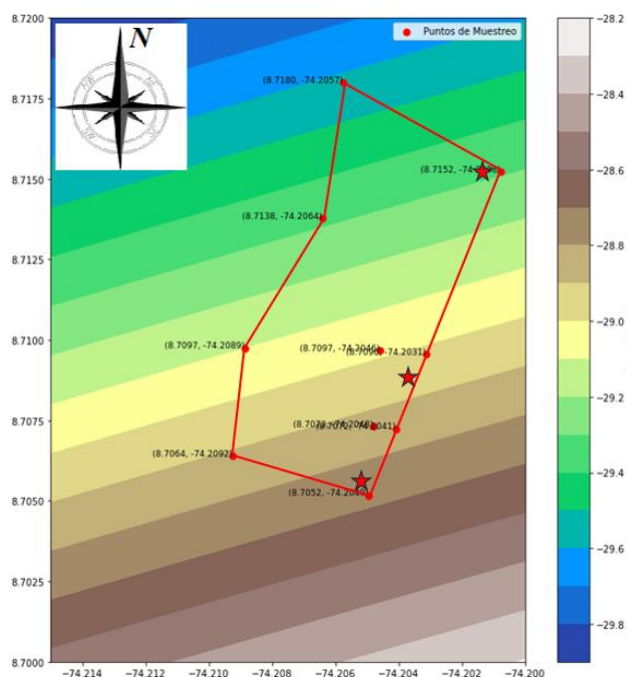
Tabla 8. Resultados del análisis físicoquímico para la muestra de suelo M3

Físicoquímico					
Análisis	Método – Técnica	LCM	Fecha de análisis	Resultado	Incertidumbre del ensayo
Mercurio Total mg/kg ss	EPA 7473, 2007 – Analizador Directo de Mercurio	0,0020	2024/07/26	0,070	-
Plomo mg/kg ss (S)	SM 3030 K / SM 3111 B – Absorción Atómica	20,0	2024/07/10	>100	-

Fuente: elaboración propia.

Los suelos analizados presentan una contaminación significativa por plomo, lo que requiere una intervención urgente para evitar la propagación del contaminante. El mercurio, aunque no es uniforme en todas las muestras, evidencia niveles elevados en algunas áreas, lo que indica la necesidad de monitoreo y remediación en sitios específicos. Existe una variabilidad significativa en los niveles de mercurio en el suelo, con algunas áreas mostrando concentraciones elevadas. La bioacumulación de mercurio en los ecosistemas locales podría representar un riesgo para la flora, fauna y comunidades cercanas.

La [Figura 2](#) muestra la representación visual del terreno en la zona de interés, utilizando un modelo digital de elevación (DEM) sobre el cual se superponen los puntos de muestreo geoespaciales. El mapa de colores en tonos que varían entre marrones y verdes claros indica los cambios en la altitud. Las áreas más elevadas están representadas por colores más claros, mientras que las zonas bajas se muestran en tonos oscuros, lo que permite identificar las regiones más altas y bajas dentro de la extensión geográfica seleccionada. Los puntos de muestreo, marcados en rojo, están distribuidos de manera regular en el área de estudio, abarcando distintas elevaciones. Cada uno de estos puntos está etiquetado con sus coordenadas geográficas (latitud y longitud) para facilitar su ubicación precisa.

Figura 2. Distribución de los niveles de contaminantes en el área de estudio

Fuente: elaboración propia.

En la [Figura 2](#) se puede inferir que las zonas de mayor elevación podrían estar menos afectadas por procesos de contaminación por arrastre, aunque esto no excluye otros posibles factores de impacto. Por ejemplo, en áreas elevadas cercanas a frentes mineros, es posible que los contaminantes viajen por el aire o por el agua superficial o subterránea y se depositen en el suelo aguas abajo. Por lo tanto, los puntos de control en esta área permiten una evaluación integral del impacto ambiental, teniendo en cuenta tanto la topografía como los posibles mecanismos de transporte de contaminantes. Las zonas más elevadas tienen menor concentración de contaminantes, lo que confirma que la dinámica hidrológica del área juega un papel crucial en la distribución de los contaminantes.

Asimismo, la [Figura 2](#) sugiere que las cuencas hidrográficas de la zona, visibles en las áreas de baja altitud, podrían ser las más susceptibles a la contaminación de fuentes externas, lo que acentúa la necesidad de monitorear estas áreas más de cerca. Se observa que las zonas bajas, representadas en colores oscuros, coinciden con puntos de alta concentración de contaminantes. Esto sugiere que la contaminación se acumula en estas áreas debido a procesos de deposición y escorrentía. Esta figura resalta la influencia de la altitud en la dispersión de contaminantes, evidenciando la vulnerabilidad de las zonas más bajas.

En particular, la acumulación de contaminantes en estas áreas puede derivar en riesgos para la biodiversidad local y los recursos hídricos, afectando tanto la calidad del agua subterránea como la superficial. En lo referente a las implicaciones para la restauración ecológica, se puede mencionar la necesidad de una intervención prioritaria en las zonas bajas para evitar que la contaminación continúe afectando los ecosistemas acuáticos.

La [Figura 2](#) muestra igualmente, cómo varían las concentraciones de contaminantes de acuerdo con las latitudes y longitudes de los puntos de muestreo, coincidiendo con lo planteado anteriormente en torno a las elevaciones de dichos puntos, revelando patrones espaciales específicos. Las áreas con concentraciones más altas están asociadas con ubicaciones cercanas a fuentes potenciales de contaminación, mientras que las zonas más alejadas muestran niveles menores, como lo es el caso de la muestra de suelo M2 en lo referente a la concentración de mercurio hallada, lo que sugiere un menor impacto ambiental. Los puntos con mayores concentraciones de contaminantes coinciden con áreas cercanas a sitios de extracción minera abandonados, mientras que los puntos ubicados en zonas más alejadas presentan niveles menores de contaminación, lo que indica que la dispersión de los contaminantes sigue un patrón influenciado por la proximidad a los focos de contaminación.

Por otro lado, la [Figura 3](#) muestra los patrones espaciales de los niveles de contaminación en la zona de estudio. Las áreas con concentraciones elevadas indican la proximidad a sitios mineros abandonados, los cuales requieren atención inmediata debido a sus posibles impactos negativos en la salud humana y el medio ambiente. Las zonas con menores concentraciones muestran una menor exposición, pero aún pueden estar influenciadas por factores externos como la dispersión de contaminantes. Este análisis permite identificar áreas críticas para aplicar medidas de mitigación y controlar los efectos de la contaminación. Así, la gestión ambiental debe enfocarse en las áreas de mayor riesgo para proteger tanto a la comunidad como a los ecosistemas locales.

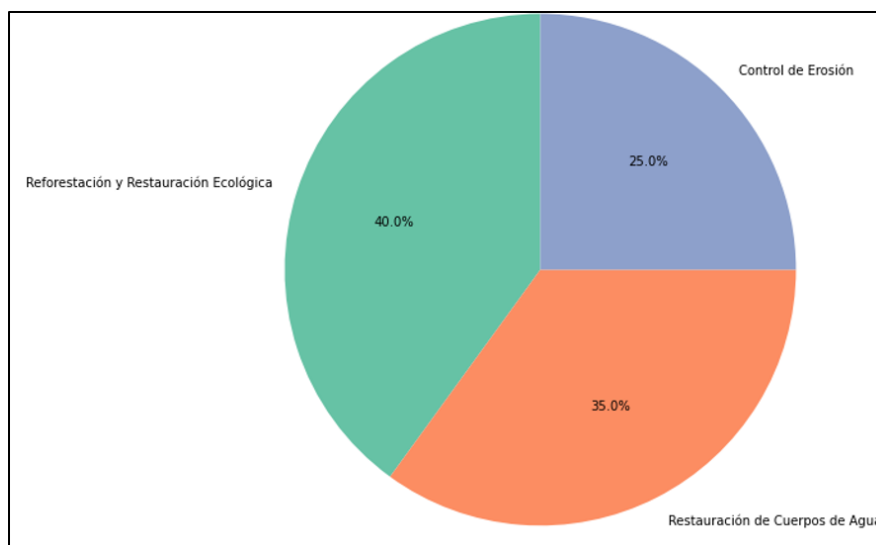
Figura 3. Panorámica de la distribución de los niveles de contaminantes

Fuente: elaboración propia.

A partir de la [Figura 3](#) se puede deducir que los sectores con mayores concentraciones de contaminantes se encuentran en áreas cercanas a cuerpos de agua y zonas bajas, lo que indica que la contaminación puede estar siendo transportada por procesos de escorrentía y sedimentación. Además, las zonas más elevadas presentan menores concentraciones, lo que sugiere que la pendiente del terreno influye en la distribución de los contaminantes. Finalmente, se podría indicar que la hidrodinámica del área juega un papel clave en la dispersión de contaminantes, con mayor acumulación en sectores de menor altitud donde el agua y los sedimentos tienden a depositarse.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en los análisis de las muestras de agua y suelo, y las características ecosistémicas del área de estudio, se propone a continuación, la implementación de estrategias y soluciones que aprovechen los procesos naturales, tales como la reforestación, la restauración de cuerpos de agua y el control de la erosión, con el fin de regenerar la biodiversidad, mejorar la calidad del suelo y reducir la contaminación de los cuerpos hídricos. Al integrar estas estrategias ecológicas, se busca restaurar el equilibrio ambiental, generando beneficios sociales y económicos para las comunidades locales, promoviendo el desarrollo sostenible en la región.

Por otro lado, la [Figura 4](#) presenta la proporción de intervención de distintas estrategias de soluciones basadas en la naturaleza (SbN) aplicadas para la rehabilitación de áreas degradadas por la minería.

Figura 4. *Distribución de la intervención con soluciones basadas en la naturaleza*

Fuente: elaboración propia.

En la representación gráfica ([Figura 4](#)), se observa que la reforestación y restauración ecológica constituyen el porcentaje más alto de las intervenciones, lo cual es coherente con la necesidad de restaurar la biodiversidad y mejorar la calidad del suelo en la zona de estudio.

En segundo lugar, la restauración de cuerpos de agua ocupa una parte significativa de la propuesta de intervención, dado el impacto que la contaminación por metales pesados tiene en los ecosistemas acuáticos y la disponibilidad de recursos hídricos para las comunidades.

Finalmente, el control de la erosión es un componente esencial dentro de la estrategia, ya que la degradación del suelo y la pérdida de su estructura facilitan la dispersión de contaminantes, lo que podría agravar el impacto ambiental si no se toman medidas correctivas oportunas.

La [Tabla 9](#) presenta una selección de especies nativas recomendadas dentro de las estrategias para el programa de reforestación en las áreas afectadas por la minería aluvial. Se detallan cuatro especies con sus respectivas características en cuanto a tipo de suelo en el que pueden desarrollarse, su beneficio ambiental y su eficiencia en la captura de carbono. Estas especies podrían ayudar a restaurar la vegetación, mejorando la calidad del suelo y contribuyendo a mitigar el cambio climático.

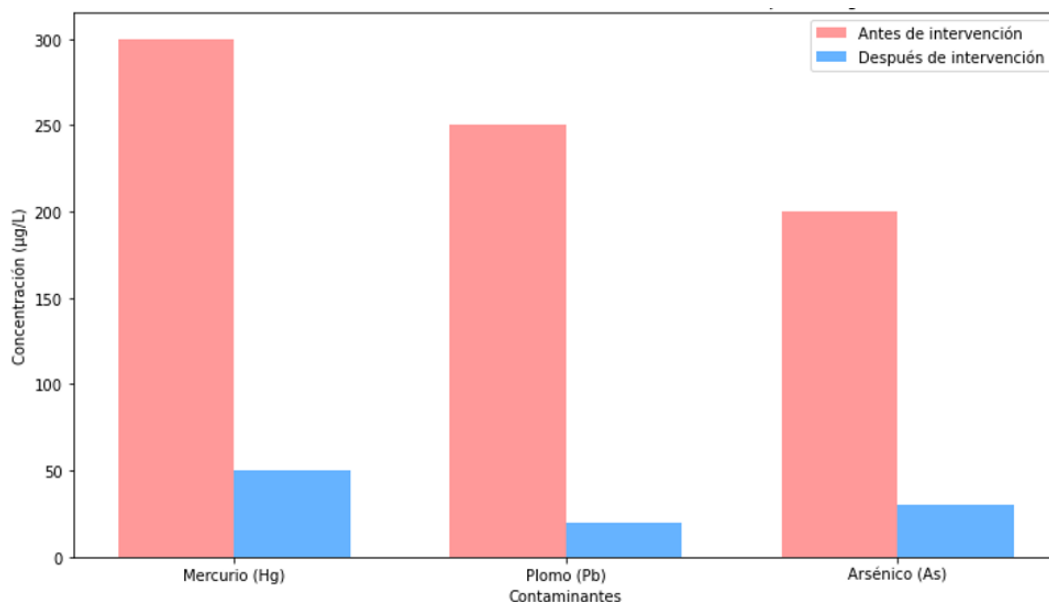
Tabla 9. *Especies nativas propuestas para reforestación*

Especie nativa	Tipo de suelo	Beneficio ambiental	% Eficiencia en captura de carbono
Guayacán (<i>Guaiaicum officinale</i>)	Suelos ácidos y arenosos	Mejora la calidad del suelo, captura carbono	20%
Ceiba (<i>Ceiba pentandra</i>)	Suelos húmedos y arcillosos	Restauración de biodiversidad	15%
Caña flecha (<i>Chusquea</i> spp.)	Suelos de pendiente	Previene la erosión	25%
Nogal (<i>Juglans australis</i>)	Suelos fértiles	Estabiliza el suelo, captura carbono	40%

Fuente: elaboración propia.

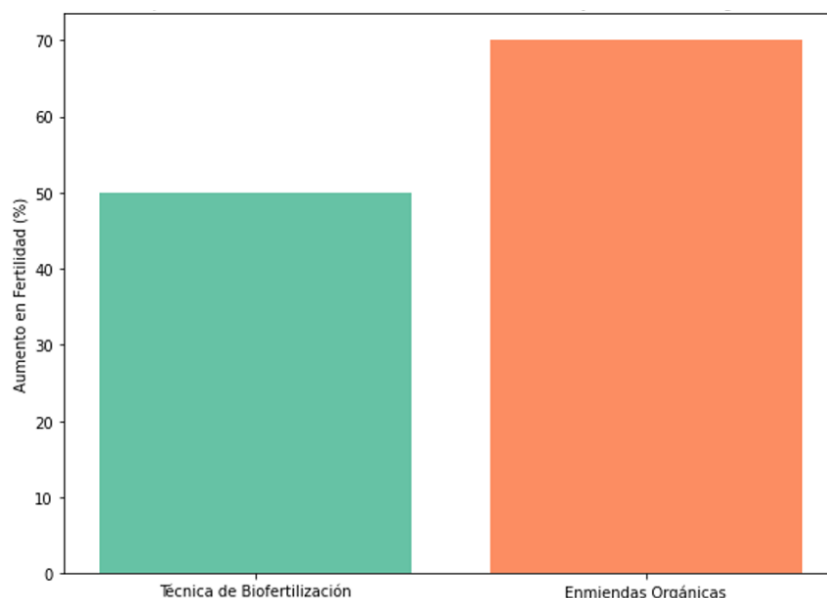
Se recomienda implementar una estrategia de combinación de especies en función de las condiciones específicas del terreno. La caña flecha y el nogal pueden utilizarse en áreas con alta erosión y necesidad de captura de carbono, mientras que el guayacán y la ceiba pueden desempeñar un papel clave en la recuperación de suelos degradados y la biodiversidad local. Esta combinación permitiría una restauración ambiental más eficiente y sostenible en el tiempo.

La [Figura 5](#) muestra la disminución esperada de los niveles de metales pesados en los cuerpos de agua tras la implementación de humedales artificiales y técnicas de fitorremediación. Se observa que con la implementación de las estrategias habría una tendencia decreciente en las concentraciones de mercurio, plomo y arsénico, lo que indicaría la efectividad de estas soluciones en la retención y filtrado de contaminantes presentes en el agua. La mayor reducción se presentaría en el caso del mercurio, lo que apunta a que la vegetación utilizada en los humedales y el proceso de absorción natural serían eficientes en la remoción de este metal. En cuanto al plomo, la disminución es significativa, aunque en menor proporción que el mercurio, lo que podría estar relacionado con la diferencia en la movilidad de estos metales en el agua. El arsénico, aunque menos prevalente en los análisis previos, también muestra una disminución notable, lo que confirma que las estrategias de fitorremediación pueden contribuir a la descontaminación progresiva de los cuerpos hídricos afectados por la minería aluvial.

Figura 5. Reducción de concentración de metales pesados en cuerpos de agua

Fuente: Elaboración propia.

En la [Figura 6](#) se observa el impacto de las técnicas de biofertilización y el uso de enmiendas orgánicas en la recuperación de suelos afectados por la actividad minera. Se observa un incremento en la fertilidad del suelo a medida que se implementan estas estrategias, lo que indica que los microorganismos benéficos y los aportes de materia orgánica juegan un papel clave en la restauración de la estructura y calidad del suelo. La biofertilización se destaca por su capacidad para restablecer el equilibrio microbiológico del suelo, favoreciendo la regeneración natural y la reincorporación de nutrientes esenciales. Por su parte, las enmiendas orgánicas muestran un impacto significativo en la retención de humedad y en la mejora de la capacidad de intercambio catiónico del suelo, lo que permite que los nutrientes sean más accesibles para la vegetación en las etapas iniciales de la recuperación ecológica.

Figura 6. *Recuperación de suelos por las técnicas de biofertilización y enmiendas orgánicas*

Fuente: Elaboración propia.

Discusión

La explotación minera en el corregimiento de Minas de Santa Cruz, ubicado en el municipio de Barranco de Loba, Bolívar, ha generado un impacto ambiental significativo, cuyas secuelas aún son evidentes, afectando tanto los cuerpos hídricos como los suelos adyacentes. Este fenómeno es característico de las regiones donde se desarrolla la minería aluvial de oro, una actividad que conlleva el empleo de metales pesados y sustancias químicas altamente tóxicas, como el mercurio y el cianuro. Investigaciones previas realizadas en diversas zonas mineras de Colombia han evidenciado que la contaminación por metales pesados en áreas cercanas a las explotaciones mineras representa un problema crítico con repercusiones directas en la biodiversidad y en la salud de la población local (Rodríguez y García 2022).

En cuanto a los análisis de calidad del agua en Minas de Santa Cruz, los resultados indican bajas concentraciones de mercurio y plomo, lo que en principio sugiere una condición ambiental favorable; sin embargo, esto no implica la ausencia de riesgos. Algunos estudios internacionales han demostrado que los efectos tóxicos de estos elementos pueden ser acumulativos y manifestarse

incluso en concentraciones considerablemente inferiores a los umbrales convencionalmente establecidos como peligrosos (Ayala, 2019).

Los hallazgos obtenidos confirman que la actividad minera aurífera ha provocado una alteración significativa en los ecosistemas locales. Aunque las concentraciones de metales pesados en las fuentes hídricas se encuentran dentro de los límites normativos, los niveles críticos de plomo en los suelos representan una amenaza latente tanto para la biodiversidad como para la salud humana. Diversos estudios han señalado que estrategias como la reforestación y la bioingeniería pueden ser alternativas viables para mitigar la contaminación edáfica y favorecer la estabilización de las áreas impactadas por la actividad extractiva.

Uno de los aspectos fundamentales en la evaluación ambiental de esta región es la presencia de contaminantes en el agua. Los análisis fisicoquímicos realizados revelan que las concentraciones de cianuro y mercurio están por debajo del umbral de cuantificación, lo que en principio es un indicador positivo; sin embargo, la persistencia de metales pesados en los cuerpos hídricos sigue siendo motivo de preocupación. Esto concuerda con investigaciones llevadas a cabo en zonas mineras de Ecuador y Perú, donde se ha documentado que la minería aluvial continúa deteriorando la calidad del agua y los ecosistemas acuáticos, incluso cuando las concentraciones de los contaminantes son relativamente bajas (Paredes et al., 2018). Asimismo, aunque los niveles de cianuro detectados sean reducidos, la interacción de estos compuestos con otros contaminantes puede generar efectos sinérgicos, amplificando su impacto tanto en los ecosistemas como en la salud de las comunidades circundantes (Medina y Castro, 2024).

Los resultados del análisis del suelo reflejan una situación preocupante, particularmente en lo que respecta a la presencia de plomo, cuyos niveles exceden los límites de seguridad establecidos. Este resultado concuerda con investigaciones previas que han documentado la acumulación de este metal pesado en suelos impactados por actividades mineras, lo que representa un potencial riesgo para la salud de la población residente en la zona (González., 2021). En especial, el plomo es reconocido por su alta toxicidad, siendo su exposición prolongada un factor determinante en la aparición de daños neurológicos irreversibles, particularmente en niños (Ramírez., 2021). Por lo tanto, el peligro de contaminación no solo compromete la integridad de los ecosistemas locales, sino también la seguridad y el bienestar de las comunidades que dependen de estos recursos naturales para su sustento.

El análisis espacial de los contaminantes, representado en la [Figura 2](#), evidencia que la concentración de metales pesados está directamente relacionada con la proximidad a las fuentes de contaminación, lo que coincide con estudios previos sobre la dispersión de contaminantes en zonas mineras. De acuerdo con investigaciones recientes, las áreas situadas en las inmediaciones de explotaciones mineras o industriales presentan niveles más elevados de contaminación en comparación con zonas más alejadas (Pérez y Ramírez., 2020). Estos resultados son fundamentales para orientar estrategias de remediación ambiental, ya que permiten focalizar las intervenciones en las áreas más afectadas y priorizar acciones de mitigación donde el impacto ambiental es más severo.

Una de las estrategias más efectivas para mitigar los impactos ambientales de la minería es la implementación de soluciones basadas en la naturaleza (SbN), entre las que destacan la reforestación y la restauración de cuerpos de agua. Estas acciones no solo contribuyen a la reducción de la contaminación, sino que también favorecen la regeneración de la biodiversidad y la captura de carbono, aspectos fundamentales en la restauración ecológica (Sánchez y Ocampo., 2023). En este sentido, la plantación de especies nativas ha sido reconocida como una alternativa sostenible para contrarrestar los daños ambientales derivados de la actividad minera, al tiempo que fortalece la resiliencia de los ecosistemas afectados. Asimismo, estudios recientes han demostrado que las especies autóctonas poseen un alto potencial para mejorar la calidad del suelo y restaurar paisajes degradados, favoreciendo la estabilidad ecológica y la recuperación de la funcionalidad del entorno.

Por otro lado, la restauración de cuerpos de agua debe ser considerada una prioridad, en particular en aquellas zonas de baja altitud que presentan mayor vulnerabilidad frente a la contaminación proveniente de fuentes externas, como se evidencia en el análisis de la [Figura 4](#). Investigaciones en restauración hídrica han demostrado que la recuperación de ecosistemas acuáticos afectados por la minería es posible mediante la aplicación de estrategias dirigidas a reducir la carga de contaminantes y mejorar la calidad del agua (Torres y Ortega., 2023). Esta problemática cobra especial relevancia en el caso del corregimiento de Minas de Santa Cruz, donde los recursos hídricos desempeñan un papel crucial tanto en la dinámica ecológica de la región como en el sustento de las comunidades locales.

El control de la erosión, tal como se detalla en la [Figura 5](#), es un aspecto fundamental en la mitigación de la dispersión de contaminantes en entornos mineros. La erosión del suelo en estas

áreas facilita la movilización de metales pesados hacia los cuerpos de agua, intensificando los efectos de la contaminación y comprometiendo la calidad ambiental (Rincón y Yépez, 2021). Diversos estudios han demostrado que la implementación de técnicas de estabilización del suelo puede reducir de manera significativa la migración de contaminantes, al tiempo que fortalece la resiliencia ecológica de los ecosistemas impactados. En este contexto, la adopción de estrategias efectivas de control de la erosión no solo favorece la recuperación del entorno afectado, sino que también contribuye a la sostenibilidad a largo plazo de los recursos naturales.

Avendaño y Restrepo (2024) concluyen que, si bien en Colombia se han impulsado iniciativas normativas para regular la gestión integral de los pasivos ambientales, la prevención de estos sigue siendo un desafío clave. Para ello, resulta indispensable una planificación adecuada que contemple tanto la rehabilitación como la restauración de las áreas afectadas. Asimismo, la implementación de un control riguroso por parte de las autoridades ambientales contribuiría a fortalecer la confianza de las comunidades en los proyectos mineros, asegurando que estos se desarrollen bajo estándares de sostenibilidad y responsabilidad ambiental.

Históricamente, la minería ha estado intrínsecamente vinculada con el entorno natural, ya que representa una actividad con implicaciones económicas, sociales, ambientales y políticas de gran alcance. Sin embargo, durante mucho tiempo, la conservación del medio ambiente fue relegada a un segundo plano, sin que se promovieran medidas efectivas de recuperación. Como consecuencia, surgieron los pasivos ambientales mineros, los cuales representan un riesgo significativo tanto para los ecosistemas como para la calidad de vida de las comunidades aledañas (Angarita y Gómez, 2023). En este sentido, la conceptualización de los pasivos ambientales en el sector minero es relativamente reciente y constituye un campo de estudio emergente dentro de la industria extractiva y la gestión ambiental.

Los pasivos ambientales mineros (PAM) representan una oportunidad significativa para la implementación de estrategias de economía circular. En este sentido, Pardavé et al. (2021) demostraron la viabilidad de reutilizar residuos mineros en la producción de espumas de vidrio comercial, utilizando una mezcla compuesta por polvo de vidrio, residuos provenientes de la minería y carburo de silicio. Para la optimización del proceso, se analizaron variables clave como la granulometría y la temperatura de sinterización, lo que evidencia el potencial de reaprovechamiento de estos materiales dentro de una lógica de sostenibilidad.

Por otro lado, el análisis de los enfoques de rehabilitación minera revela que, en su mayoría, estos no incorporan las dimensiones económicas y sociales, lo que dificulta su integración con los principios del desarrollo sustentable (Torres Batista et al. 2019). Este vacío conceptual y metodológico limita la efectividad de los procesos de recuperación de áreas degradadas, al no considerar de manera integral los impactos socioeconómicos de la actividad minera.

Asimismo, según lo planteado por Muñoz López y Vega Sánchez (2021), a pesar de la relevancia de la minería en Colombia, aún existen deficiencias en la disponibilidad de herramientas que permitan evaluar con precisión los aspectos ambientales, financieros, técnicos y sociales al momento de ejecutar un cierre de mina, ya sea temporal o definitivo. En este contexto, se hace imprescindible la participación coordinada de todos los actores involucrados, incluyendo comunidades locales, empresas mineras, profesionales del sector, entidades gubernamentales y organismos privados. Un enfoque participativo garantizaría una gestión más eficiente y equitativa de los pasivos ambientales, promoviendo soluciones sostenibles y socialmente responsables.

La mayor concentración de pasivos ambientales mineros (PAM) se encuentra en depósitos aluviales y palustres, afectando principalmente ecosistemas acuáticos y mixtos, como humedales costeros e interiores. Estas zonas, caracterizadas por su fragilidad ecológica, presentan una mayor susceptibilidad a la dispersión de elementos contaminantes derivados de residuos químicos y mineros, lo que incrementa el impacto ambiental en áreas vulnerables (Bruguera et al. 2022).

En este contexto, la implementación de soluciones basadas en la naturaleza (SbN) para la renaturalización y restauración de cuerpos de agua es una estrategia clave. No obstante, como lo señalan Ribas Palom y Saurí Pujol (2022), el éxito de estas medidas depende de su alineación con el conocimiento experto sobre la dinámica de los cursos fluviales y la ocupación humana en llanuras de inundación. Una adecuada planificación y aplicación de estas estrategias permite no solo restaurar ecosistemas degradados, sino también mejorar la gestión del riesgo de inundaciones, asegurando su efectividad a largo plazo.

Las soluciones basadas en la naturaleza (SbN) constituyen un concepto integral que abarca diversas estrategias basadas en la funcionalidad de los ecosistemas. Estas incluyen medidas de manejo, protección, conservación y restauración ambiental, además del desarrollo de infraestructura sostenible orientada a la reducción de riesgos por desastres naturales y a la adaptación y mitigación del cambio climático (Zagare, 2022). Como enfoque multidimensional, las soluciones basadas en la naturaleza (SbN) ofrecen una alternativa viable para abordar los impactos de los pasivos

ambientales mineros, promoviendo soluciones resilientes y sostenibles frente a los desafíos ecológicos actuales.

Conclusiones y recomendaciones

El estudio realizado en el corregimiento de Minas de Santa Cruz, Bolívar, evidencia que, a pesar del prolongado impacto ambiental generado por la minería aluvial, los niveles de cianuro, mercurio y plomo en el agua se encuentran dentro de los límites establecidos por las normativas internacionales. Sin embargo, la elevada concentración de plomo en el suelo sugiere una contaminación significativa, lo que representa un riesgo latente tanto para la salud humana como para la biodiversidad del área. Los análisis fisicoquímicos confirman una dicotomía crítica: mientras las aguas muestran concentraciones de cianuro (<0.010 mg/L), mercurio (<0.00050 mg/L) y plomo (<0.010 mg/L) bajo límites peligrosos ([Tablas 3-5](#)), los suelos presentan contaminación severa por plomo (>100 mg/kg en todas las muestras; Tablas 6-8), superando 5 veces el umbral aceptable (20 mg/kg). Esto sugiere procesos de lixiviación incompleta y acumulación edáfica de metales.

Los resultados obtenidos muestran una distribución geoespacial clara de los contaminantes, con concentraciones más elevadas en las proximidades de las zonas de explotación minera. Las cuencas hidrográficas, especialmente aquellas ubicadas en áreas de menor altitud, se presentan como los sectores más afectados, debido al transporte y acumulación de contaminantes mediante procesos de escorrentía y sedimentación. Esta situación demanda una atención prioritaria para evitar un deterioro progresivo de los recursos hídricos locales. Aunque los niveles actuales de contaminación en el agua son bajos, el riesgo de bioacumulación de metales pesados en los ecosistemas podría desencadenar efectos adversos a largo plazo, lo que subraya la necesidad de implementar estrategias de mitigación y restauración ambiental continuas. La modelación geoespacial ([Figuras 2 y 3](#)) muestra la correlación entre elevación y contaminación: zonas bajas (coordenadas: 8.705°N , 74.204°W) acumulan plomo por escorrentía. Puntos cercanos a minas abandonadas (M1, M3) muestran niveles críticos de Hg (0.100 mg/kg y 0.070 mg/kg), validando el impacto residual de operaciones extractivas.

Los análisis fisicoquímicos corroboran que las concentraciones de cianuro y mercurio en el agua no representan un riesgo inmediato. No obstante, los niveles elevados de plomo en el suelo superan los estándares aceptables, indicando una situación crítica de contaminación edáfica.

Adicionalmente, los mapas geoespaciales revelan que las zonas más impactadas coinciden con aquellas que han experimentado una intensa actividad minera a lo largo del tiempo, lo que reafirma la urgencia de aplicar medidas de remediación ambiental en estas áreas prioritarias.

El estudio resalta la relevancia de las soluciones basadas en la naturaleza (SbN), como la reforestación y la restauración de cuerpos de agua, para mitigar los impactos ambientales derivados de la minería aluvial de oro. Estas estrategias no solo contribuyen a la regeneración de ecosistemas degradados, sino que también mejoran la calidad del suelo y facilitan la captura de carbono, favoreciendo la mitigación del cambio climático. Por tanto, la implementación de estas acciones resulta fundamental para garantizar un desarrollo sostenible en la región.

Se recomienda realizar un monitoreo constante en las áreas afectadas por la minería aluvial de oro, con el fin de evaluar la evolución de los contaminantes en el suelo y el agua, prestando especial atención a aquellas zonas más próximas a las fuentes de contaminación y a los cuerpos hídricos. Asimismo, es necesario profundizar en estudios que analicen los efectos a largo plazo de la contaminación por metales pesados, particularmente el plomo y el mercurio, con el objetivo de identificar los posibles riesgos ambientales y sanitarios que puedan afectar tanto a las comunidades locales como a los ecosistemas.

Los resultados obtenidos evidencian la urgencia de implementar estrategias de remediación en las zonas más afectadas por la minería aurífera aluvial. La aplicación de las soluciones basadas en la naturaleza (SbN) no solo permitirá mitigar los impactos negativos de esta actividad, sino que también fomentará un modelo de desarrollo ambientalmente sostenible para la región.

Es esencial promover programas de reforestación con especies nativas, como el Guayacán y la Ceiba, ya que estas no solo favorecen la recuperación del suelo, sino que también contribuyen a la captura de carbono, generando beneficios ambientales a largo plazo. Estas medidas deben complementarse con estrategias de control de erosión y restauración de cuerpos de agua, garantizando así la sostenibilidad y conservación de los recursos naturales en el territorio. Se deben desarrollar protocolos de remediación basados en evaluación multicriterio para sitios con un alto impacto ([Figura 3](#)), e incorporar a las comunidades locales en el mantenimiento de las soluciones basadas en la naturaleza (SbN), usando modelos participativos validados en una fase siguiente del proyecto.

Finalmente, se recomienda impulsar programas de educación y concientización ambiental, dirigidos a las comunidades locales, con el propósito de fomentar prácticas agrícolas y mineras sostenibles.

Estas acciones no solo contribuirán a la protección del medio ambiente, sino que también fortalecerán el desarrollo económico de la región, garantizando al mismo tiempo el bienestar y la seguridad de las generaciones futuras.

Referencias bibliográficas

- Angarita Amador, G.N., y Gómez Cárdenas, L.M. (2023). La minería y su impacto económico y ambiental: desarrollo. *Revista Espacios*, 44(2) 16-29.
- Avendaño Buenahora, J. S., y Restrepo, G. (2024). Evaluación de pasivos ambientales en el componente suelo por actividades mineras amparadas en dos autorizaciones temporales, en la provincia García Rovira, Santander. *Revista Opera*, (35), 171-191. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9650047>.
- Ayala, H. (2019), Impactos de la minería en la dimensión social. En: Identificación y análisis de impacto de la actividad minera y la explotación ilícita en los ecosistemas del territorio nacional, Sentencia T 445 de agosto de 2016 Investigación científica y sociológica respecto a los impactos de la actividad minera en los ecosistemas del territorio colombiano. <http://www.humboldt.org.co/images/documentos/3-identificacin-de-impactos-expertos.pdf>
- Bruguera Amarán, N. C., Gallardo Martínez , D., Álvarez Santander, J. R., Ramírez Hernández, R., y Hernández García, L. I. (2022). Caracterización geoambiental del inventario de pasivos ambientales en la región minera. *Ecovida*, 12(1), 14-30.
- Chia Pinto, L.A., (2020). Pasivos ambientales mineros en Colombia. Universidad Militar Nueva Granada. <https://repository.umng.edu.co/server/api/core/bitstreams/fa1c9e46-cb5b-4fcb-bfda-b079799202b3/content>
- Contraloría General de la República. (2021). Auditoría de desempeño pasivos ambientales mineros coordinada con la OLACEFS 2015-2020. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2022/02/Informe-Auditoria-de-Desempeno-Pasivos-Ambientales-Mineros-OLACEFS-2020.pdf>
- Creswell, J. W., & Clark, V. L. P. (2017). *Designing and Conducting Mixed Methods Research*. SAGE Publications.

Departamento Administrativo de la Función Pública (DAF). (2023). Ley 2327 de 2023.

Gobernación de Bolívar. (2024). Plan de Desarrollo Bolívar me Enamora 2024-2027.
<https://www.bolivar.gov.co/web/seccion/planes-e-informes/plan-de-desarrollo-vigente/>

González, C. (2021). "Impacto y gestión de los pasivos ambientales mineros en áreas de minería ilegal en Colombia.". Revista de Ciencias Ambientales

Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2018). Metodología de la investigación (Vol. 4). McGraw-Hill Interamericana México.

Medina, P., & Castro, H. (2024). "Nuevas tecnologías en la remediación de pasivos ambientales mineros: Una visión hacia el futuro sostenible.". Sustainability in Mining Journal.

Muñoz López, J. M., y Vega Sánchez, J. C. (2021). Cierre anticipado o temporal de minas: Pautas para un modelo contextualizado en el departamento del Cesar, Colombia. Respuestas, 26(1), 150-157.

Pardavé Livia, W., Plata, Y., y García Díaz, W. S. (2021). Disminución de pasivos ambientales mineros PAM mediante la obtención de espuma de vidrio. Revista Colombiana de Materiales, (18), 33-42.

Pérez, L., & Ramírez, S. (2020). Efectos de la minería ilegal en los ecosistemas de la región Caribe. Boletín Científico del Medio Ambiental.

Ramírez, J. (2021). Contaminación por mercurio en ecosistemas acuáticos: Impacto de la minería de oro. Journal of Toxicology and Environmental Health.

Ribas Palom, A., y Saurí Pujol, D. (2022). Las soluciones basadas en la naturaleza como estrategia en la gestión del riesgo de inundación. Cuadernos de Geografía, 108-109(2), 819-832.

Rincón Montero, F. E., y Yépez Navarro, V. P. (2021). Análisis a las problemáticas asociadas a los pasivos ambientales. Gerencia Libre, 5, 103-115.
<https://files.core.ac.uk/download/352930831.pdf>.

Rodríguez, V., y García, E. (2022). Evaluación del impacto del mercurio en zonas de minería ilegal en Colombia. Revista Latinoamericana de Medio Ambiente.

- Ruiz Ortíz, A. F., Adame Rodríguez, J. A., Araujo Medina, L. C., Díaz Muegue, L. C., & Cespedes Guevara, N. Y. (2024). Diagnóstico de la problemática de los pasivos ambientales mineros (PAM) producto de la extracción de materiales de construcción en Mondoñedo, departamento de Cundinamarca. *Revista Ingenierías USBMed*, 15(2), 36-43. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9776815>
- Sánchez, I., & Ocampo, D. (2023). Recuperación ecológica en zonas mineras: Un enfoque en la rehabilitación de la biodiversidad. *Ecological Restoration Review*.
- Torres Batista, Y., Rodríguez Córdova, R., y Argüelles Reynaldo, C. (2019). Aproximación teórica a un modelo de gestión económico-ambiental para la rehabilitación minera. *Revista Luna Azul*, (48), 109-120.
- Torres, J., y Ortega, D. (2023). Consecuencias ambientales de la minería ilegal en Colombia: Un enfoque en la gestión de recursos hídricos. *Ecology and Environment Journal*.
- Zagare, V. M. (2022). Soluciones basadas en la Naturaleza: una alternativa hacia el desarrollo urbano. *Notas CPAU*, 51, 26-31. https://pure.tudelft.nl/ws/portalfiles/portal/145061995/CPAU.Zagare_Web.pdf

Agradecimientos

Los autores y la autora agradecen a todas las personas e instituciones que contribuyeron a la realización de este estudio, especialmente a la comunidad local del corregimiento de Minas de Santa Cruz en el departamento de Bolívar, quienes brindaron su apoyo y colaboración durante el proceso de recolección de muestras y datos.

Potencial conflicto de intereses

No existe conflicto de intereses que involucre a los autores.

1 Fundación Universitaria del Área Andina, Valledupar, Cesar, Colombia, laraujo@areandina.edu.co, ORCID. 0000-0001-5422-4809 <https://scholar.google.es/citations?user=Fe2PasiAAAAJ&hl=es>

2 Fundación Universitaria del Área Andina - Correo electrónico: Posdoctora en Ciencias, Doctora en Educación , ncespedes@areandina.edu.co – ORCID: 0000-0003-3490-342X - Google Scholar: <https://scholar.google.es/citations?user=WNjAGjMAAAAJ&hl=es>

3 Fundación Universitaria del Área Andina - Correo electrónico: ralmanza4@estudiantes.areandina.edu.co – ORCID: 0009-0004-6610-6534 - Google Scholar: <https://scholar.google.es/citations?hl=es&user=2EQu7XMAAAAJ>

4 Fundación Universitaria del Área Andina - Correo electrónico: Idiaz164@areandina.edu.co - ORCID: 0000-0001-9587-6061 - Google Scholar: <https://scholar.google.es/citations?user=IriD008AAAAJ&hl=es>

Para citar este artículo: Araujo Medina, L.C., Céspedes Guevara, N.Y., Almanza Gloria, R.C., y Díaz Muegue, L.C., (2025). Diagnóstico de los pasivos ambientales mineros producto de la extracción de oro aluvial en el municipio de Barranco de Loba, Bolívar. Revista Luna Azul, (61), 93-123. DOI: <https://doi.org/10.17151/luaz.2025.61.5>

Esta obra está bajo una [Licencia de Creative Commons Reconocimiento CC BY](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)



Código QR del artículo

