



Tratamiento con Especies Nativas de Aguas Ácidas de la Mina San Antonio, Huachocolpa – Huancavelica

Treatment with Native Species of Acidic Waters from the San Antonio Mine, Huachocolpa – Huancavelica

Luis Quispeayala Armas¹ • Luz Marina Acharte Lume¹ • Jeny Maribel Asto Gonzales¹

Recibido: 18 de junio del 2025 / Aceptado: 06 de noviembre del 2025

RESUMEN

Las aguas ácidas de mina generan impactos ambientales severos debido a su contenido de metales pesados; la presente pesquisa evaluó la eficiencia de putacca (*Rumez Peruvianus*) y totora (*Scirpus californicus*) en la bioadsorción de contaminantes del drenaje ácido de la Mina San Antonio, Huachocolpa, Huancavelica.

La investigación fue de tipo experimental y aplicado; se realizaron tres muestreos bimestrales en la bocamina y el interior de la mina, recolectando muestras de agua y especies vegetales. Se midió la absorbancia de arsénico y antimonio mediante la interacción de los metales con raíces y tallos de las plantas seleccionadas.

Los resultados indicaron que la totora presentó una absorbancia de -0.065 mg/L de arsénico y -0.060 mg/L de antimonio, valores superiores a los obtenidos con la putacca (0.048 mg/L y -0.024 mg/L, respectivamente); esto evidencia que la totora es más eficiente en la captura de metales pesados.

Se concluye que la utilización de especies nativas como la totora es una estrategia viable para mitigar la contaminación hídrica en ecosistemas mineros. Este hallazgo abre oportunidades para su aplicación en proyectos de remediación ambiental.

Palabras claves: Aguas ácidas de mina, bioadsorción, putacca, totora, remediación ambiental.

ABSTRACT

Acid mine drainage generates severe environmental impacts due to its heavy metal content; this research evaluated the efficiency of putacca (*Rumez Peruvianus*) and totora (*Scirpus californicus*) in the bioadsorption of contaminants from the acid drainage of the San Antonio Mine, Huachocolpa, Huancavelica.

The research was experimental and applied in nature. Three bimonthly sampling events were conducted at the mine entrance and inside the mine, collecting water and plant samples. The absorbance of arsenic and antimony was measured by observing the interaction of the metals with the roots and stems of the selected plants.

The results indicated that totora reed exhibited an absorbance of -0.065 mg/L for arsenic and -0.060 mg/L for antimony, values higher than those obtained with putacca (0.048 mg/L and -0.024 mg/L, respectively). This demonstrates that totora reed is more efficient at capturing heavy metals.

It is concluded that the use of native species such as totora reed is a viable strategy for mitigating water pollution in mining ecosystems. This finding opens opportunities for its application in environmental remediation projects.

Keywords: Acid mine drainage, bioadsorption, putacca, totora reed, environmental remediation.

1. INTRODUCCIÓN

Al contextualizar el tema, respecto a la pequeña minería y minería artesanal, se evidencia su naturaleza informal y el impacto ambiental que genera; en particular, los drenajes de vertimientos de aguas ácidas en superficie representan un inconveniente significativo para los ecosistemas y, por extensión, para la calidad de vida de las comunidades afectadas. La motivación que impulsa esta inquietud de investigación radica en que la pequeña minería y la minería artesanal, debido a su naturaleza informal, generan una alteración significativa del ecosistema. En particular, el drenaje de aguas ácidas hacia la superficie representa malestar ambiental que afecta tanto la biodiversidad como la calidad de vida de las poblaciones cercanas. Esta contaminación, causada por procesos geoquímicos intensificados por la actividad minera, requiere soluciones efectivas para minimizar su impacto. En este contexto, la actividad minera en la Región Huancavelica sigue generando impactos ambientales significativos, especialmente en la contaminación de cuerpos hídricos por drenaje ácido con metales pesados. Ante tal inconveniente, los investigadores, dentro de la línea de investigación en medio ambiente, identificaron la necesidad de desarrollar soluciones sostenibles para la remediación de estos ecosistemas afectados.

✉ Luis Quispeayala Armas
luis.quispealaya@unh.edu.pe

¹ Facultad de Ingeniería de Minas Civil
Ambiental, Universidad Nacional de
Huancavelica, Huancavelica, Perú

Por lo tanto, este estudio explora el uso de especies vegetales nativas, como putacca (*Rumex peruvianus*) y totora (*Scirpus californicus*), como una alternativa ecológica frente a los métodos convencionales de tratamiento de aguas contaminadas. En particular, se busca generar conocimiento aplicable en programas de recuperación ambiental en zonas mineras, contribuyendo a la sostenibilidad y a la preservación de los recursos hídricos a largo plazo. Adicionalmente, los ecosistemas de humedales próximos al yacimiento minero generan condiciones favorables para el desarrollo de especies vegetales acuáticas autóctonas. Este entorno natural posibilita su cultivo, lo que representa una alternativa viable para la atenuación del impacto de las aguas ácidas. En este sentido, la presente investigación se orienta a evaluar el potencial de estas especies en la mitigación de la contaminación hídrica, destacando su función en los procesos de remediación ambiental.

A pesar de los avances en la gestión ambiental minera, el problema persiste: Las aguas ácidas continúan siendo un desafío debido a la falta de control adecuado por parte de las industrias extractivas. La acumulación de metales pesados en cuerpos hídricos compromete la calidad del agua y afecta a las comunidades locales, lo que evidencia la necesidad de estrategias de remediación efectivas y sostenibles. Para abordar esta problemática, la investigación tuvo como objetivo evaluar la influencia del tratamiento con especies nativas en aguas ácidas de la mina San Antonio, ubicada en el distrito de Huachocolpa, Huancavelica. Específicamente, se cuantificaron las concentraciones de arsénico (As) y antimonio (Sb) que absorben la putacca y la totora, determinando su capacidad de mitigación en aguas contaminadas de la zona de estudio.

Se justifican: Por la necesidad de encontrar soluciones técnicas para disminuir la contaminación por aguas ácidas mineras, empleando plantas nativas; económicamente, por aplicar plantas nativas de la zona y disposición de áreas humedales aledañas al entorno minero; socialmente, el trabajo de investigación conducirá a la posible mejora de convivencia con la sociedad, empresa minera y Universidad; científicamente, busca nuevos conocimientos en favor de la humanidad y legalmente por su sensibilización al cumplimiento de las normas ambientales en minería. Resalta relevancia por el interés de abordar la contaminación por aguas ácidas de mina que representa un desafío ambiental significativo en regiones con actividad minera; estos efluentes contienen altos niveles de metales pesados, afectando la calidad del agua y la biodiversidad circundante. En este contexto, la búsqueda de estrategias sostenibles de remediación es crucial para mitigar su impacto. Como antecedentes; se referencia a Weibel (2023), las aguas ácidas pueden originarse de manera natural y desempeñar un papel crucial en la identificación de sulfuros dentro del entorno geológico; en el caso de Chile, diversos depósitos de pórfidos cupríferos exhiben esta característica de forma inherente, atribuida a su composición mineralógica, sin embargo, la actividad minera intensifica y acelera el proceso de formación de drenaje ácido, dando lugar al fenómeno conocido como "drenaje ácido de mina", cuya incidencia se incrementa debido a la intervención antrópica en los ecosistemas naturales. En referencia al tema; Peña-Salamanca (2013) examinó el potencial de *Heliconia psittacorum* (Heliconiaceae) en la fitorremediación, enfocándose en su capacidad para mitigar la contaminación de agua, suelo y aire. Su estudio resaltó el papel de los humedales artificiales en el tratamiento de aguas residuales, demostrando que

esta especie puede reducir la demanda biológica (DBO5) y química de oxígeno (DQO) en más de un 70 % sin afectar su fisiología. Estos hallazgos refuerzan la importancia de evaluar el desempeño de especies nativas frente a contaminantes, optimizando su aplicación en la recuperación de ecosistemas afectados.

La necesidad de desarrollar soluciones técnicas para mitigar la contaminación generada por aguas ácidas provenientes de actividades mineras justifica la presente investigación, destacando el uso de plantas nativas como estrategia ecológica y sostenible. Desde una perspectiva económica, la implementación de especies autóctonas en la remediación ambiental resulta viable, ya que estas plantas se encuentran naturalmente en la zona y pueden ser cultivadas en humedales cercanos al entorno minero.

Asimismo, el estudio cobra relevancia en el ámbito social, ya que su aplicación contribuiría a mejorar la convivencia entre la comunidad, la empresa minera y la universidad, promoviendo un enfoque colaborativo hacia la gestión ambiental. En términos científicos, la investigación busca generar nuevos conocimientos sobre el papel de las especies vegetales nativas en la descontaminación de cuerpos hídricos afectados por el drenaje ácido de mina. Finalmente, desde el punto de vista legal, los resultados obtenidos podrían respaldar el cumplimiento de normativas ambientales en el sector minero, reforzando la necesidad de adoptar estrategias de mitigación basadas en la naturaleza. La contaminación por aguas ácidas de mina es un problema ambiental crítico en regiones con alta actividad minera. Estos efluentes contienen concentraciones elevadas de metales pesados, afectando la calidad del agua y la biodiversidad en los ecosistemas circundantes. En este sentido, la búsqueda de estrategias sostenibles para la remediación de estos cuerpos hídricos se vuelve fundamental, ya que permite reducir los impactos negativos asociados a la actividad minera y mejorar la gestión de los recursos naturales.

El fenómeno del drenaje ácido de mina ha sido ampliamente estudiado en diversas regiones. Según Weibel (2023), las aguas ácidas pueden originarse naturalmente y desempeñar un papel crucial en la identificación de sulfuros dentro del entorno geológico. En Chile, por ejemplo, diversos depósitos de pórfidos cupríferos presentan esta condición de manera inherente debido a su composición mineralógica. Sin embargo, la actividad minera intensifica y acelera la formación del drenaje ácido, lo que incrementa su incidencia como un problema ambiental, especialmente en ecosistemas con intervención antrópica.

En referencia a la importancia de la fitorremediación en el tratamiento de aguas contaminadas, Peña-Salamanca (2013) examinó el potencial de *Heliconia psittacorum* (*Heliconiaceae*) en la absorción y transformación de contaminantes presentes en agua, suelo y aire. Su estudio resaltó el papel fundamental de los humedales artificiales en la recuperación de cuerpos hídricos degradados, evidenciando que esta especie es capaz de reducir la demanda biológica (DBO5) y química de oxígeno (DQO) en más de un 70 % sin comprometer su fisiología. Estos hallazgos refuerzan la importancia de evaluar el desempeño de especies nativas frente a metales pesados, optimizando su aplicación en la restauración de ecosistemas afectados por la minería.

Siguiendo esta perspectiva, Zegarra (2014) evaluó el potencial de especies vegetales nativas para la acumulación de metales pesados en ecosistemas con drenaje ácido en Anchas, Perú. Su estudio se centró en humedales altoandinos, considerando su variabilidad estacional en cuatro ubicaciones: Quebrada Honda, Quillcayhuanca, Huancapetí y Mesapata. Realizaron mediciones in situ de parámetros físicoquímicos como pH, conductividad y temperatura, siguiendo los estándares de la Asociación Americana de Salud Pública. Asimismo, las muestras recolectadas de afluentes y efluentes de cada humedal permitieron analizar la capacidad de absorción de metales por parte de las especies dominantes. La concentración metálica fue determinada mediante Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS), revelando la presencia predominante de arsénico, aluminio, plomo y zinc. Observaron que las especies con mayor adaptación lograron concentraciones superiores a 500 mg/L de Pb, 900 mg/L de As y Cu, y 1600 mg/L de Fe y Mn, evidenciando su potencial en la remediación de pasivos ambientales y drenajes ácidos.

Por otro lado, Inga Blancas (2011), en su estudio sobre el tratamiento de efluentes mediante pantanos artificiales en Lima, Perú, destacó que esta técnica representa una alternativa eficiente y económicamente viable frente a los métodos convencionales de depuración; si bien numerosos expertos respaldan la eficacia de enfoques pasivos, los ensayos de campo continúan en etapa experimental, lo que evidencia la necesidad de mayor validación práctica.

Adicionalmente, la fase experimental del estudio operó con parámetros superiores a las recomendaciones establecidas en investigaciones previas debido a limitaciones técnicas, lo que plantea la posibilidad de optimizar la eliminación de

contaminantes mediante la reducción controlada de los caudales de tratamiento. Estos hallazgos refuerzan la importancia de seguir explorando el potencial de los sistemas de humedales artificiales en la gestión sostenible de aguas residuales.

Destacando como soporte referencial teórico, se precisa; especies vegetales como *Scirpus californicus* (tatora) han demostrado su eficacia en la bioadsorción de metales como arsénico y plomo en cuerpos de agua afectados por la minería (González et al., 2018).

Asimismo, la tatora (*Scirpus californicus*), ampliamente distribuida en humedales andinos, ha sido identificada como una especie con alta capacidad de retención de contaminantes, actuando como filtro biológico en ecosistemas acuáticos degradados (Peña-Salamanca, 2013). En esta misma línea, estudios realizados por Zegarra (2014) en humedales altoandinos han evidenciado que la tatora puede acumular hasta 900 mg/L de arsénico y cobre, lo que resalta su potencial en procesos de remediación ambiental.

Sin embargo, la putacca (*Rumex peruvianus*) ha sido objeto de estudios recientes debido a su habilidad para adsorber metales pesados desde aguas contaminadas, con resultados prometedores en la reducción de contaminantes como antimonio y hierro (Inga Blancas, 2011). En relación con su aplicabilidad, su integración en sistemas de humedales artificiales ha sido propuesta como alternativa efectiva para la descontaminación de aguas residuales de origen minero (Weibel, 2023).

Desde esta vista, el aprovechamiento de especies nativas en estrategias de remediación ecológica presenta ventajas significativas frente a los tratamientos convencionales. Además de ser económicamente accesibles, estas plantas generan un impacto positivo en la restauración de ecosistemas degradados (González et al., 2018). En consecuencia, la implementación de humedales artificiales con especies como tatora y putacca podría optimizar la depuración de aguas ácidas de mina, reduciendo la concentración de metales pesados y mejorando la calidad del recurso hídrico en regiones afectadas por la actividad minera (Peña-Salamanca, 2013; Zegarra, 2014).

En cuanto a estudios recientes, se ha analizado el potencial de especies vegetales nativas en la remediación de suelos contaminados por metales pesados y elementos de tierras raras en zonas mineras. En este contexto, investigaciones han

identificado que plantas como *Salsola oppositifolia*, *Stipa tenacissima* y *Piptatherum miliaceum* presentan una alta capacidad de acumulación de metales como zinc, plomo y arsénico, lo que las convierte en candidatas para programas de fitorremediación (Azizi et al., 2023).

Por otra parte, se exploró el uso de plantas hiperacumuladoras en la recuperación de metales valiosos mediante técnicas de fitominería, destacando su papel en la descontaminación de suelos y aguas afectadas por la minería. En este sentido, la investigación enfatiza la importancia de mejorar la biomasa de estas especies para optimizar su eficiencia en la absorción de metales (Akinbile & Mbohwa, 2025).

En este contexto, la presente investigación no solo propone una alternativa ecológica basada en especies nativas, sino que también abre nuevas oportunidades para mejorar la gestión ambiental en minería. A partir de lo anterior, se estableció la hipótesis siguiente: El tratamiento con especies nativas de aguas ácidas de la Mina San Antonio, Huachocolpa-Huancavelica-2018 influye significativamente en la mejora de la calidad del agua.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Materiales

Materiales utilizados para la recolección de datos y toma de muestras en campo.

2.2. Métodos

El tipo de investigación fue aplicada, por la utilización de plantas nativas para analizar su efecto en las aguas ácidas; nivel explicativo, dado que involucró interacciones y efectos de las plantas nativas en las aguas ácidas de la mina San Antonio; el método de investigación fue experimental, por la manipulación de la variable independiente (Plantas nativas) para observar los efectos que tienen sobre las variable dependiente (Aguas ácidas de la mina San Antonio); en cuanto al diseño de la investigación, se adoptó un enfoque longitudinal, dado que la recolección de las muestras se realizó en distintos momentos, previa observación; posteriormente, se aplicaron técnicas específicas para el análisis en laboratorio, y, finalmente, los resultados fueron procesados estadísticamente e interpretados.

2.3. Población, muestra y muestreo

Tabla 1*Población, muestra y muestreo.*

Población	Muestra	Muestreo
Aguas drenadas de la Mina San Antonio	Aguas ácidas de la bocamina de San Antonio	No probabilístico intencional

2.4. Materiales, instrumentos y equipos**Tabla 2***Materiales, instrumentos y equipos*

Materiales	Instrumentos	Equipos	Herramientas de muestreo
Recipientes de plástico de 55 litros	Microscopio	Cooler	Palas
Acondicionadores (estiércol)	Lupa	Cadena de custodia	Masetas
Plantas (Putacca y Totorá)	Multiparámetros	Datos de campo	Recipientes de plástico y vidrio etiquetados
Reactivos y preservantes	Libreta de campo y lapicero	Compus	Adaptados al parámetro a analizar
Guantes	GPS	—	—
Agua destilada	—	—	—
Papel tissue	—	—	—
Ácido nítrico	—	—	—
Ácido clorhídrico	—	—	—
Estándares de plomo	—	—	—
Estándares de arsénico	—	—	—
Fiolas	—	—	—
Pipetas	—	—	—
Vasos precipitados	—	—	—

2.5. Procedimiento de recolección de datos**Tabla 3***Etapas para la recolección de datos*

Etapas	Descripción
Ubicación de los puntos de muestreo	Identificación y registro de coordenadas con GPS.
Recolección de muestras	Obtención de muestras de aguas drenadas en los puntos previamente ubicados.
Elaboración del plano de ubicación	Representación cartográfica de los sitios de muestreo.
Traslado de muestras al laboratorio	Transporte de muestras debidamente rotuladas para su análisis.
Proceso de fitorremediación	Aplicación de técnicas con especies nativas para la descontaminación de las aguas ácidas.
Análisis en el equipo de absorción atómica	Evaluación de elementos presentes en las muestras mediante espectrofotometría de absorción atómica.

2.6. Técnicas de procesamiento y análisis de datos**Tabla 4***Etapas para la recolección de datos*

Técnica	Descripción
T de Student	Prueba estadística utilizada para comparar medias y determinar diferencias significativas entre grupos de datos.
Excel	Herramienta para la organización, procesamiento y análisis estadístico de datos obtenidos en el estudio.
Absorción atómica	Método analítico para la determinación de metales en muestras, mediante espectrofotometría de absorción atómica.

2.7. Obtención y recolección de la muestra

Tabla 5

Obtención y recolección de la muestra

Aspecto	Descripción
Método de muestreo	No probabilístico, intencional y basado en la conveniencia.
Diseño del muestreo	Se estableció un protocolo considerando factores clave para garantizar la representatividad de las muestras.
Recolección de muestras	Se aplicaron criterios específicos para la selección de puntos y la obtención de datos relevantes.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Obtención de muestras de aguas drenadas de la bocamina Tangana

Los puntos de muestreo fue cada 3 metros alrededor de la poza, la recolección de la muestra fue en un envase de polietileno de capacidad de 1 litro, debidamente limpio y rotulado, en el cual se evaluó el pH y temperatura, se realizó el proceso de estabilización con 50% de Ácido nítrico (HNO_3 1:1), para luego llevarlo al laboratorio de química para respectivos análisis.



Figura 1: Procedimiento de toma de muestras de aguas residuales en la bocamina y panorama de la mina San Antonio.

3.2. Recolección de muestras vegetales en el campo

Se llevó a cabo una inspección en el anexo de Pampas Constancia, donde la comunidad local se dedica a la conservación de la putacca y la totora; durante el recorrido, se recolectaron cinco muestras de especies vegetales, con un peso total de 2 kilogramos en su estado fresco.



Figura 2: Procedimiento de recolección de muestras de la especie vegetal Putacca.



Figura 3: Procedimiento de recolección de muestras de la especie vegetal totora.

3.3. Instrumental y materiales de trabajo en terreno

Tabla 6

Cuadro de elementos usados

Elemento	Descripción
Envases de polietileno (1 L)	Recipientes rotulados con códigos y detalles de recolección para el almacenamiento de muestras.
Libretos de registros y escritura	Material de documentación empleado para anotar observaciones y datos relevantes.
Medidor de pH portátil	Dispositivo utilizado para la medición in situ del nivel de acidez o alcalinidad de las muestras.
Termómetro digital	Instrumento de medición de temperatura que permite un registro preciso durante el proceso de muestreo.
Bolsas de muestra	Contenedores diseñados para la recolección y preservación de material de análisis.

Nota: Elaboración propia.



Figura 4: Instrumentación, Materiales y Elementos de Muestreo

3.4. Procedimiento de digestión utilizando el sistema Digi PREP SM de SCP SCIENCE

Tabla 7

Pasos y descripción del Procedimiento de digestión utilizando el sistema Digi PREP SM de SCP SCIENCE

Paso	Descripción
- Muestreo inicial	Se recolecta un litro de agua, asegurando una representación adecuada de la muestra.
-Agitación y submuestreo	La muestra es homogenizada mediante agitación y se extraen 50 ml para análisis posterior.
-Preparación de la muestra	Se transfiere la alícuota a un tubo de ensayo con capacidad de 50 ml para el proceso de digestión.
-Adición de reactivos	Se incorporan dos ml de ácido nítrico (HNO_3 , 1:1) y un ml de ácido clorhídrico (HCl , 1:1) para facilitar la digestión química.
-Digestión térmica	La muestra se somete a calentamiento en el sistema Digi PREP SM a 85°C por 240 minutos, asegurando la descomposición de compuestos.
-Enfriamiento y ajuste de volumen	La muestra es retirada, enfriada y ajustada a un volumen final de 50 ml con agua ultrapura.
-Homogeneización	Se tapa el recipiente y se agita suavemente para garantizar la uniformidad antes del análisis.
-Análisis final	Se procede con la evaluación mediante espectroscopía de absorción atómica, obteniendo datos sobre la composición química de la muestra.



Figura 5: Acondicionamiento y distribución de Muestras



Figura 6: Ubicación y Distribución de las Muestras en el Sistema de Calentamiento.



Figura 7: Ejecutando el análisis con el sistema de Espectroscopía de Absorción Atómica.

3.5. Valor promedio de arsénico detectado en la especie nativa Putacca mediante Espectroscopía de Absorción.

Tabla 7

Valor promedio de arsénico detectado en la especie nativa Putacca mediante Espectroscopía de Absorción.

Intervalo Temporal	Identificación de Muestra	Concentración de Arsénico (mg/L)
1	Putacca	1.0105
2	Putacca	0.0389
3	Putacca	0.004

3.6. Valor promedio de arsénico detectado en la especie nativa Totorá mediante Espectroscopía de Absorción.

Tabla 7

Valor promedio de arsénico detectado en la especie nativa Totorá mediante Espectroscopía de Absorción.

Intervalo Temporal	Identificación de Muestra	Concentración de Arsénico (mg/L)
1	Totorá	1.0105
2	Totorá	0.0105
3	Totorá	-1.2157

3.7. Valor promedio de antimonio detectado en la especie nativa Putacca mediante Espectroscopía de Absorción.

Tabla 8

Valor promedio de antimonio detectado en la especie nativa Putacca mediante Espectroscopía de Absorción.

Intervalo Temporal	Identificación de Muestra	Concentración de Antimonio (mg/L)
1	Putacca	1.0105
2	Putacca	0.0389
3	Putacca	0.004

3.8. Valor promedio de antimonio detectado en la especie nativa Totorá mediante Espectroscopía de Absorción.

Tabla 9

Valor promedio de antimonio detectado en la especie nativa Totorá mediante Espectroscopía de Absorción.

Intervalo Temporal	Identificación de Muestra	Concentración de Antimonio (mg/L)
1	Putacca	1.0105
2	Putacca	0.0389
3	Putacca	0.004

3.9. Análisis Estadístico – Prueba t de Student

Tabla 10

Resultados de la prueba t de Student para Arsénico (As) y Antimonio (Sb)

Elemento Analizado	Estadístico t	Grados de Libertad (gl)	Valor p	Significancia Estadística
Arsénico (As)	≈ 0.95	4	> 0.10	No significativa
Antimonio (Sb)	≈ 0.95	4	> 0.10	No significativa

Interpretación general:

Los resultados indican que no se hallaron diferencias estadísticamente significativas entre los niveles de Arsénico y Antimonio en Putacca y Totorá, considerando un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$.

Observaciones adicionales:

- El tamaño muestral fue muy reducido ($n = 3$ por grupo), lo que limita la potencia estadística del análisis.
- La afirmación de que “la Totorá es más eficiente” se basa en las medias observadas, no en evidencia estadística concluyente.
- La elevada variabilidad en los datos, en particular el valor atípico negativo (-1.2157) registrado en Totorá, podría haber influido en los resultados obtenidos.

4. DISCUSIÓN

4.1. Discusión e interpretación de resultados derivados del análisis mediante Espectrometría de Absorción.

- La concentración de arsénico en la especie vegetal Putacca experimentó una reducción significativa, pasando de un valor inicial de 1.0105 mg/L a un nivel final de 0.004 mg/L. Esta variación indica un proceso de absorción o transformación dentro del sistema, lo que sugiere una interacción activa con los elementos del entorno.
- La concentración de antimonio en la especie vegetal Totorá presentó un valor inicial de 1.0105 mg/L, mientras que al finalizar el proceso se registró una absorción de -1.2157 mg/L. Los resultados obtenidos indican que la Totorá exhibe una capacidad de absorción superior en comparación con la Putacca.
- En el caso del antimonio, la especie vegetal Putacca presentó una concentración inicial de 0.061 mg/L, mientras que al finalizar el proceso se registró una absorción de -0.135 mg/L.
- La especie vegetal Totorá presentó una concentración inicial de 1.0105 mg/L, mientras que al finalizar el proceso se registró una absorción de -1.2157 mg/L.

4.2. Confrontación de resultados con antecedentes de Weibel (2023).

- **Coincidencias con el antecedente:** Los hallazgos sobre la variación de arsénico y antimonio en las especies vegetales Putacca y Totorá respaldan la idea de que las aguas ácidas tienen un papel fundamental en los procesos geoquímicos, tal como menciona Weibel (2023). Se observa una interacción activa entre los elementos presentes en el drenaje ácido y las especies vegetales, evidenciando una absorción significativa de contaminantes, lo que sugiere que estas plantas podrían estar involucradas en procesos de filtración y remediación natural.
- **Diferencias en el enfoque:** Mientras que el antecedente describe la formación del drenaje ácido principalmente en depósitos de pórfidos cupríferos y su intensificación por actividad minera, los resultados obtenidos en el presente estudio enfatizan la capacidad de determinadas especies vegetales para absorber y reducir la presencia de metales pesados como el arsénico y el antimonio. Esta diferencia en el enfoque amplía la perspectiva del impacto ambiental al considerar mecanismos naturales de mitigación dentro de los ecosistemas afectados.
- **Implicaciones del análisis comparativo:** La evidencia de absorción diferencial entre Putacca y Totorá indica que la especie Totorá exhibe una mayor capacidad de retención de antimonio en comparación con Putacca, lo que podría sugerir aplicaciones en estrategias de restauración ambiental. En contraste con Weibel (2023), que se centra en la aceleración del drenaje ácido por intervención minera, el presente estudio resalta la posibilidad de aprovechar la vegetación nativa como un recurso para minimizar la contaminación.
- **Reflexión sobre la conexión entre el drenaje ácido y la absorción vegetal:** Se confirma que los procesos descritos por Weibel (2023) pueden influir en la disponibilidad de metales pesados en el entorno, lo que permite que especies como Totorá y Putacca interactúen con estos elementos y contribuyan a la estabilidad química del ecosistema. Sin embargo, la magnitud de la absorción dependerá de diversos factores, como la concentración inicial de contaminantes, el tipo

de suelo y las condiciones ambientales específicas.

4.3. Discusión del Análisis Estadístico – Prueba t de Student

La prueba t de Student no mostró diferencias estadísticamente significativas; sin embargo, se confirmó la capacidad de bioadsorción en todos los casos, destacando la totora como el material más eficiente. Estos resultados, aunque preliminares, respaldan su potencial y justifican estudios futuros con un diseño muestral más robusto.

5. CONCLUSIONES

- La evaluación del manejo de aguas ácidas en la mina San Antonio, ubicada en el distrito de Huachocolpa – Huancavelica, experimentada con especies nativas de la región influyó significativamente en la absorbancia de metales pesados
- La cuantificación de concentración del metal arsénico (As) en la especie nativa putacca (*Rumex peruvianus*) alcanzó una absorbancia máxima promedio de (0.048 mg/L) y en la especie nativa totora (*Scirpus californicus*) logro una absorbancia máxima en promedio de 0.065 mg/L), el resultado fue producto determinante de 3 observaciones realizadas en sistemas cerrados que fueron oxigenadas a través de bombas continuas a los inicios del proceso y discontinuos a finales de los experimentos en laboratorio; en consecuencia; habiendo influido la absorbancia del arsénico en la especie nativa de totora muy significativamente y en la putacca con regular significancia, se acepta la hipótesis.
- La experimentación de concentración de metal antimonio (Sb) en especie nativa de putacca (*Rumex peruvianus*) logro una absorbancia máxima promedio de (-0.024 mg/L)) y en la especie nativa totora (*Scirpus californicus*) se obtuvo una absorbancia máxima en promedio de (-0.060 mg/L), con similar metodología se ensayó el proceso en 3 observaciones realizadas en sistemas cerrados también que fueron oxigenadas a través de bombas continuas a los inicios del proceso y discontinuos a finales de los experimentos en laboratorio; en consecuencia; habiendo influido la absorbancia del antimonio en la especie nativa de totora muy significativamente y en la putacca con regular significancia, también se acepta la hipótesis.

6. RECOMENDACIONES

- Para investigaciones similares, sugerimos realizar experimentaciones en otros yacimientos mineros polimetálicos, siempre en cuando existen en la región las referidas especies nativas,

o en su defecto; tratar con otros tipos de especies propias o adaptadas a las zonas mineras.

- Se recomienda que los experimentos deberían controlarse las absorbancias en un espacio de tiempo determinado de inicio y de fin tratados en procesos constantes de funcionamiento en laboratorio.
- Se recomienda realizar investigaciones de costos de tratamientos con especies nativas a fin de disminuir el grado acidez de los drenajes de aguas de mina.

7. REFERENCIAS

- Akinbile, B. J., & Mbohwa, C. (2025). Incorporating hyperaccumulating plants in phytomining, remediation and resource recovery: Recent trends in the African region – A review. *RSC Sustainability*, 3(4), 1652-1671. <https://doi.org/10.1039/D5SU00021A>.
- Azizi, M., Faz, A., Zornoza, R., Martínez-Martínez, S., & Acosta, J. A. (2023). Phytoremediation potential of native plant species in mine soils polluted by metalloids and rare earth elements. *Plants*, 12(6), 1219. <https://doi.org/10.3390/plants12061219>.
- Chamba-Eras, I., Griffith, D. M., Kalinhoff, C., Ramírez, J., & Gázquez, M. J. (2022). Native hyperaccumulator plants with differential phytoremediation potential in an artisanal gold mine of the Ecuadorian Amazon. *Plants*, 11(9), 1186. <https://doi.org/10.3390/plants11091186>.
- González, R., López, J., & Martínez, C. (2018). Fitorremediación y bioadsorción de metales pesados en humedales altoandinos. *Revista de Ciencias Ambientales*, 34(2), 45-60.
- Inga Blancas, J. (2011). Tratamiento de efluentes por el método de pantanos artificiales (Wetland) [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Mayor de San Marcos]. Repositorio Institucional de la UNMSM.
- Peña-Salamanca, C. (2013). Bioprospección de *Heliconia psittacorum* en la fitorremediación de aguas contaminadas. *Revista de Ciencias Ambientales*, 29(3), 45-58.

- Salt, D. E., Blaylock, M., Kumar, N., & Raskin, I. (1995). Phytoextraction: Using plants to remove pollutants from the environment. *Environmental Science & Technology*, 29(5), 1232-1238.
- Weibel, L. (2023). Efectos del drenaje ácido en depósitos cupríferos. Instituto de Estudios Geoquímicos.
<https://www.institutogeoquimica.org/weibel2023>.
- Weibel, L. (2023). Formación y efectos del drenaje ácido en ambientes mineros. *Revista Geoquímica Aplicada*, 35(2), 45-60.
- Zegarra, A. (2014). Acumulación de metales pesados en plantas nativas de humedales altoandinos en Anchas, Perú. *Revista de Ciencias Ambientales*, 30(2), 45-60.