

Evaluación de la contaminación por drenaje ácido en la

Cuesta de Hornillos, Yarabamba, Arequipa, Perú

Avaliação da contaminação por drenagem ácida na
Cuesta de Hornillos, Yarabamba, Arequipa, Peru

Assessment of acid drainage pollution in
Cuesta de Hornillos, Arequipa, Peru

Edgard Gutiérrez Salinas¹, Madeleine Guillén Gómez¹,
Mauro Valdivia Bustamante¹, Armando Minaya Lizarraga¹ y Gustavo Baptista²

¹ Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa
Facultad de Geología, Geofísica y Minas
Arequipa, Perú

² Universidade de Brasília (UnB), Instituto de Geociências
Brasília, Brasil

egutierrez@unsa.edu.pe; mguillen@unsa.edu.pe; pvaldiviab@unsa.edu.pe; aminayal@unsa.edu.pe;
gmbaptista@gmail.com

Gutiérrez: <https://orcid.org/0000-0003-2092-1459>

Guillén: <https://orcid.org/0000-0001-8181-8581>

Valdivia: <https://orcid.org/0000-0003-2345-2619>

Minaya: <https://orcid.org/0000-0001-5739-6315>

Baptista: <https://orcid.org/0000-0002-1973-2725>

Resumen

Al noreste del distrito de Yarabamba, varios asentamientos humanos están expuestos a la contaminación por drenaje ácido en el sector Cuesta de Hornillos, cuyas aguas infiltradas de minas abandonadas contaminan la quebrada La Zorra. Estos asentamientos se ubican entre los 2.400 y 3.500 msnm, en una planicie al sureste de Arequipa, con un clima desértico y cálido. Están emplazados en el Batólito de la Caldera, con presencia de rocas intrusivas ácidas características de la zona. Existen minas de sulfuros abandonadas con pasivos ambientales que requieren soluciones. El drenaje ácido afecta la salud y el ecosistema. Un método rápido de detección fue con la aplicación de imágenes satelitales. Las escombreras de minas abandonadas contaminan aguas superficiales y subterráneas con metales pesados. Estudios geoquímicos estáticos y dinámicos predijeron la presencia y desarrollo del drenaje ácido, evaluando el equilibrio entre el potencial de acidificación y neutralización.

PALABRAS CLAVE: pasivos ambientales mineros; drenaje ácido; metales pesados.

Resumo

A nordeste do distrito de Yarabamba, vários assentamentos humanos estão expostos à contaminação por drenagem ácida no setor Cuesta de Hornillos, cujas águas infiltradas de minas abandonadas contaminam o riacho La Zorra. Esses assentamentos estão localizados entre 2.400 e 3.500 metros acima do nível do mar, em uma planície a sudeste de Arequipa, com um clima desértico e quente. Eles estão situados no Batólito da Caldera, com presença de rochas intrusivas ácidas características da região. Existem minas de sulfuros abandonadas com passivos ambientais que requerem soluções. O drenagem ácida afeta a saúde e o ecossistema. Um método rápido de detecção foi a aplicação de imagens de satélite. Os resíduos das minas abandonadas contaminam as águas superficiais e subterrâneas com metais pesados. Estudos geoquímicos estáticos e dinâmicos previram a presença e o desenvolvimento da drenagem ácida, avaliando o equilíbrio entre o potencial de acidificação e neutralização.

PALAVRAS-CHAVE: passivos ambientais de mineração; drenagem ácida; metais pesados.

Abstract

In the northeast of the Yarabamba district, several human settlements are exposed to acid drainage contamination in the Cuesta de Hornillos sector, where water infiltrating from abandoned mines contaminates the La Zorra stream. These settlements are located between 2,400 and 3,500 meters above sea level, on a plain southeast of Arequipa, with a hot, desert climate. They are located in the Caldera Batholith, with the presence of acidic intrusive rocks characteristic of the area. There are abandoned sulfide mines with environmental liabilities that require solutions. Acid drainage affects health and the ecosystem. A rapid detection method was the application of satellite imagery. Abandoned mine tailings contaminate surface and groundwater with heavy metals. Static and dynamic geochemical studies predicted the presence and development of acid drainage, evaluating the balance between acidification and neutralization potential.

KEYWORDS: mining environmental liabilities; acid drainage; heavy metals.

1. Introducción

En el extremo nororiental de Yarabamba se encuentran los poblados de San Antonio, Pampas Nuevas y Linares, situados sobre terrenos volcano-clásticos con tufo volcánicos y rocas intrusivas ácidas a intermedias. Este estudio, parte de un proyecto de investigación de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, que busca identificar los pasivos ambientales mineros y la posible contaminación en la zona de Cuesta de Hornillos, donde minas abandonadas e informales exponen desmontes y escombreras que generan problemas de contaminación debido a la precipitación, erosión e intemperización. El objetivo fue diagnosticar la contaminación existente y su impacto en los asentamientos circundantes, utilizando análisis geoquímicos, ensayos estáticos y cinéticos para evaluar el drenaje ácido.

2. Materiales y métodos En Cuesta de Hornillos (Yarabamba), las minas abandonadas e informales exponen desmontes y depósitos

mineros que, con la precipitación y otros factores hidrometeorológicos, contaminan el área (López *et al.*, 2002). Se realizó un estudio de contaminación de pasivos ambientales utilizando datos sobre geomorfología, clima, geología, sensoramiento remoto e impacto ambiental (Navone, 2003). Se incluyó la recolección de datos de las minas San Antonio, Santa Cecilia, Espinal, Espinal N°3, Pelayo N°2 y San Luis de Hornillos. La metodología incluyó percepción, observación, definición y caracterización de riesgos.

2.1 Área de estudio

La zona de estudio se localiza al sureste de la ciudad de Arequipa; abarca altitudes de 2.450 a 3.200 msnm (FIGURA 1), con un clima desértico y cálido. La temperatura varía entre 7,0°C y 25,0°C; una estación de verano (diciembre-marzo) con presencia de garúa y una estación de invierno (abril-noviembre) con temperaturas frías y presencia de vientos.

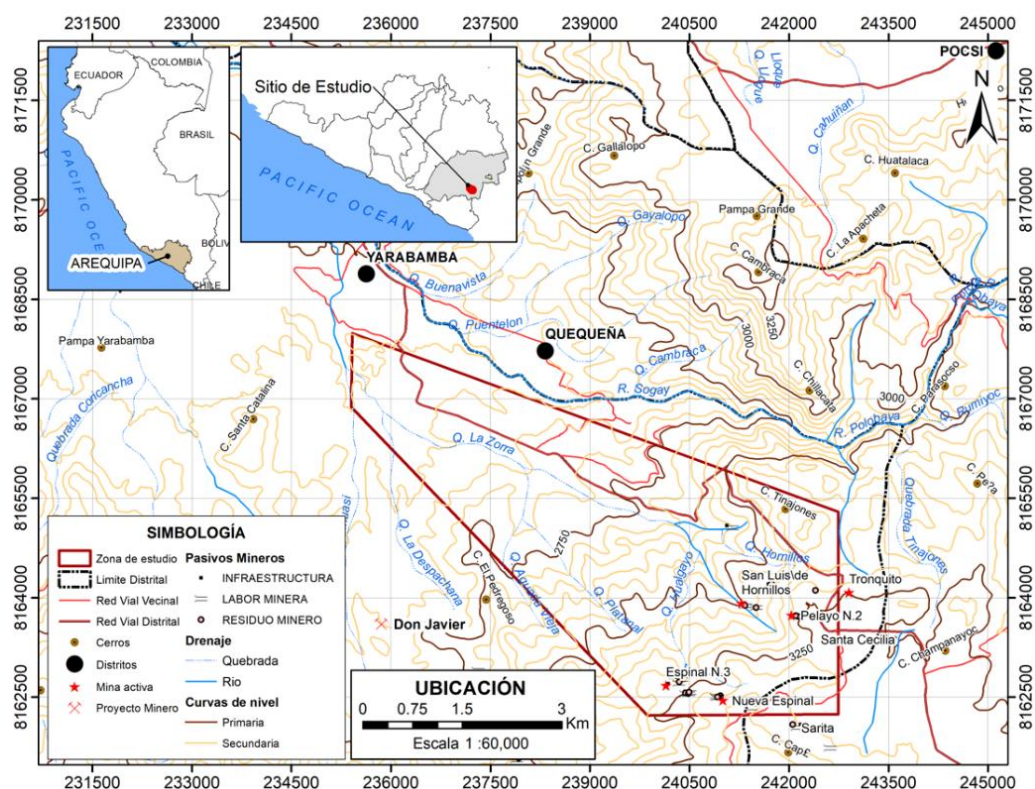


FIGURA 1. Ubicación de los pasivos ambientales, zona de Hornillos-Yarabamba. Fuente: elaboración propia

2.1.1 Geología

La geología del área abarca desde el Jura-Cretácico hasta el Cuaternario. El Grupo Yura (Pino *et al.*, 2004) incluye la formación Puente, con areniscas cuarzosas oxidadas, y la formación Cachíos, compuesta por lutitas carbonosas y areniscas cuarcíticas. En el Neógeno Plioceno, se consolida la formación Añashuayco (Aguilar *et al.*, 2016), presentando rocas volcánicas de composición riolítica. Los depósitos cuaternarios

están constituidos por gravas y arenas no consolidadas, cubren las rocas preexistentes en los cauces de quebradas y riberas de ríos. El Plutón Siete Toldos (Cretácico Superior-Paleógeno Inferior), está compuesto por tonalitas (Chávez, 1982), y la Superunidad Yarabamba, con granodioritas (Cobbing y Pitcher, 1983; Pitcher, 1985), presentan una zona de brechas de cuarzo-turmalina (FIGURA 2).

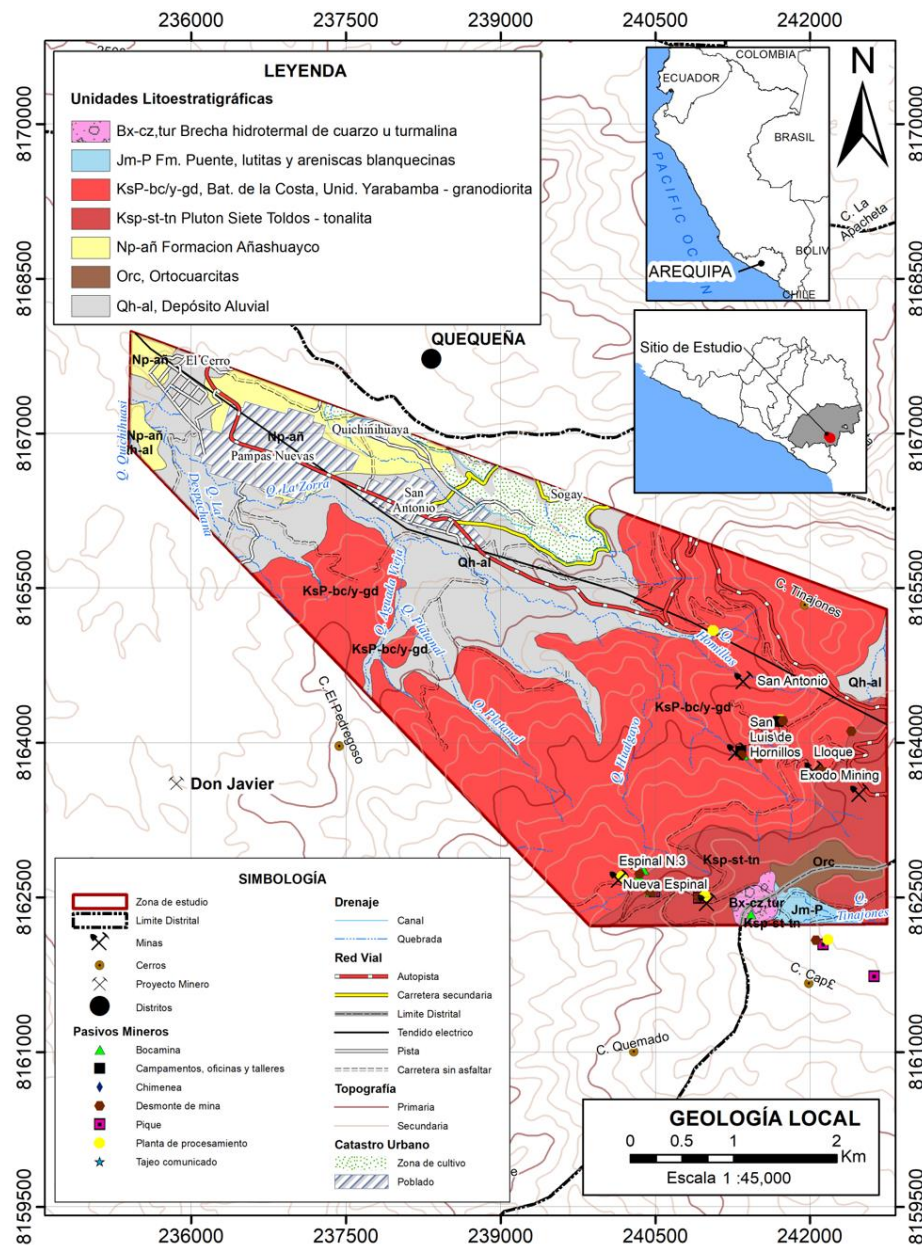


FIGURA 2. Unidades litológicas de la zona de Hornillos-Yarabamba. Fuente: elaboración propia

La mineralización es epitermal a mesotermal, con sulfuros de cobre y hierro, y minerales como cuprita, crisocola y pirita, localizándose minas activas y abandonadas que afectan la quebrada La Zorra y el río Yarabamba.

2.2 Metodología de predicción del drenaje ácido

Para la predicción del drenaje ácido (Smart *et al.*, 2002), se realizó una etapa de muestreo de residuos mineros y aguas. La campaña de muestreo se llevó a cabo entre el 22 y el 30 de septiembre de 2020, recolectando 3 muestras de agua para análisis químicos y 9 muestras de sedimentos de botaderos mineros. Estas muestras fueron enviadas al laboratorio para análisis mineralógico y geoquímico, incluyendo tests de potencial de generación de drenaje ácido como el Test ABA (CIMM y S., 2007) y la extracción secuencial. Se realizaron pruebas en celdas de humedad durante 20 semanas para evaluar la calidad de los lixiviados y predecir el drenaje ácido.

2.2.1 Muestreos geoquímicos de sedimentos

El muestreo de sedimentos se identificó inicialmente con imágenes satelitales y luego en campo, considerando escombreras de minas abandonadas o paralizadas.

A) Ensayos geoquímicos de sedimentos

Los ensayos para predecir el drenaje ácido incluyeron pruebas estáticas y dinámicas:

- Pruebas Estáticas: Se aplicó el Test ABA (*Acid-*

Base Account) y su versión modificada para medir el potencial ácido (PA) y el potencial de neutralización (PN).

Estas pruebas permiten identificar la capacidad de generación de ácido y neutralización de los residuos mineros (Price y Errington, 1997; Zamora y Benzaazoua, 2003). Se midió el pH en pasta para detectar generación de ácido, (pH > 8 sugiere carbonatos reactivos; pH < 5 indica generación de ácido).

- Pruebas Dinámicas: Complementan los resultados de las pruebas estáticas y predicen la tasa de producción de ácido y el desarrollo del drenaje ácido en función del tiempo (Zamora y Benzaazoua, 2003). La prueba de celdas húmedas acelera la meteorización natural y verifica los resultados de las pruebas estáticas. El potencial de neutralización (PN) se mide en equivalentes de carbonato de calcio (CaCO_3) y se calcula el potencial neto de neutralización (PNN) como la diferencia entre PN y PA.

A.1) Tests Estáticos

El Test ABA clasifica el potencial de generación de ácido en bajo, marginal o alto. La relación PN/PA determina la categoría y la necesidad de pruebas cinéticas adicionales (TABLA 1). Conceptualmente un número positivo indica un potencial alcalino, mientras que un número negativo sugiere potencial ácido.

TABLA 1. Determinación del potencial de generación de acidez. Fuente: elaboración propia

PNN	PN/PA	Interpretación
>20	>3	Bajo o nulo potencial de generación de ácido
<20	1 a 3	Potencial marginal de generación de ácido
<0	<1	Alto Potencial de generación de ácido
-20 y 20	Si PN/PA > 3	Bajo Riesgo de formar drenaje ácido
Difícultosa	Si PN/PA varía de 1 a 3	Zona de Incertidumbre (hacer Test Cinético)

El Test NAG (Generación Neta de Acidez) complementa al Test ABA al medir el potencial neto de generación ácida mediante oxidación acelerada de sulfuros en presencia de peróxido.

El pH en pasta proporciona una estimación cualitativa del pH inicial de la muestra, indicando la capacidad de neutralización o presencia de acidez mineral (Kania, 1998).

A.2) Test Cinético

El test dinámico o cinético intenta reproducir de forma acelerada los procesos naturales de oxidación y meteorización que ocurren en el medio (García, 2013). Para ello, se utilizó el Test de Celda Húmeda (TCH), basado en la norma ASTM D5744-96 (*Standard Test Method for Accelerated Weathering of Solid Materials Using a Modified Humidity Cell*). Este test permitió simular la reactividad química de una muestra de mineral en laboratorio, construyendo columnas de lixiviación que se nutren periódicamente con los materiales de alimentación, concentrado y relave. Se controló semanalmente los parámetros químicos de lixiviados como el pH y la conductividad eléctrica, permitiendo determinar la calidad del agua de drenaje y su variación en el tiempo.

Las mediciones de pH y conductividad verificaron si el agua de las muestras genera acidez y en qué lapso de tiempo ocurre este proceso. Además, se calculó el Eh (potencial de oxidación) utilizando la fórmula: $Eh = 1,23 - 0,59 \text{ pH}$ (Robertson y Barton, 1990). El test simula la meteorización natural acelerada de una muestra sólida, generando efluentes semanales movilizados por una solución acuosa que es agregada, colectada y analizada durante 20 semanas. El ciclo semanal incluyó tres días de

inyección de aire seco (humedad relativa < 10%), tres días de inyección de aire húmedo (humedad relativa > 95%), y un día de riego con agua. Este test tuvo como objetivo determinar la calidad del efluente (ácido, alcalino o neutro), así como el contenido de cationes y aniones en los efluentes, midiendo el pH-Eh, la conductividad eléctrica, la alcalinidad/acidez y la concentración de metales (Robertson y Barton, 1990).

2.2.2 Muestreo geoquímico de aguas

El drenaje ácido de roca (DAR) resulta de los procesos de oxidación y lixiviación de minerales sulfurosos, variando desde ligeramente alcalino a ácido. Los principales productores de DAR son los drenajes en minas subterráneas, minas abandonadas, escorrentías en minas a tajo abierto, lixiviados de escombreras, residuos mineros y relaveras expuestas (Dos Santos *et al*, 2020). En septiembre del 2020 se realizó una campaña de muestreo de aguas siguiendo el protocolo Nacional de Monitoreo de la Autoridad Nacional del Agua (ANA). Los puntos de muestreo se identificaron con imágenes satelitales y se ubicaron en campo, considerando accesibilidad y posible presencia de DAR. Los puntos fueron PM-1 (Qda La Zorra), PM-2 (Qda La Zorra II) y PM-3 (Qda Alto Hornillos), (TABLA 2).

TABLA 2. Localización de los puntos de muestreo de aguas. Fuente: elaboración propia

Punto de muestreo	Altitud (msnm)	Coordenadas E	Coordenadas N	Lugar de muestreo
PM-1	2845,00	926,456	8°213,425	Qda La Zorra
PM-2	2712,00	929,356	8°134,567	Qda La Zorra II
PM-3	2659,00	987,567	8°325,865	Qda Alto Hornillos

Se caracterizó la calidad del agua en cada punto, siguiendo el protocolo para aguas superficiales del ANA. Las muestras fueron recolectadas en frascos de 600 ml, homogeneizadas y enviadas al laboratorio AGQ-Lima para su análisis geoquímico.

2.2.3 Ensayo geoquímico de aguas

El drenaje ácido de pH bajo y rico en metales depende del tiempo, con una química del agua

de drenaje que se torna gradualmente más ácida y con concentraciones crecientes de metales. Se evaluaron elementos esenciales como aniones, metales totales y disueltos, pH, alcalinidad y acidez. Para los sólidos en suspensión se aplicó la técnica de Gravimetría, para los carbonatos la técnica ICP-OES, para bicarbonatos la titulación volumétrica, y para la mayoría de los elementos minerales se aplicó la técnica ICP-MS y la espectrofotometría UV-Vis.

3. Resultados y discusión

3.1 Ensayos estáticos: resultados y discusión

Se obtuvieron los resultados del Test ABA de sedimentos y del Test NAG.

3.1.1 Ensayos y discusión del Test ABA de sedimentos

Los resultados del Test ABA se obtuvieron del análisis de 9 muestras de sedimentos y se

interpretaron según los parámetros siguientes (TABLA 3): Azufre total, Fizz Rating, pH Pasta, Potencial de acidez máximo (MPA), Potencial de neutralización Neto (NNP), Potencial de neutralización Lawrence, Ratio Potencial de Neutralización (RNP), Sulfato total y Sulfuro total.

TABLA 3. Resultados analíticos de los análisis de sedimentos del área de Yarabamba. Fuente: elaboración propia

	Punto de Muestreo	BOT-001	BOT-002	BOT-003	BOT-004	BOT-005	BOT-006	BOT-007	BOT-008	BOT-009
Parámetro	Unidades									
Test ABA										
Azufre Total	%	0,02	0,06	0,05	0,17	0,16	0,06	0,02	0,05	0,02
Fizz Rating		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1	0,0	0,0	0,0
pH Pasta	Unidades de pH	7,28	7,60	7,27	7,61	7,35	7,44	7,33	5,55	7,44
Potencial de Acidez Máximo (MPA)	Kg CaCO ₃ /Ton	0,313	1,56	0,938	5,00	3,44	1,25	0,313	0,938	0,313
Potencial de Neutralización Neto (NNP)	Kg CaCO ₃ /Ton	3,22	3,96	3,59	2,02	0,59	8,30	4,71	-0,90	3,72
Potencial Neutralización Lawrence	Kg CaCO ₃ /Ton	3,53	5,52	4,53	7,02	4,03	9,55	5,02	0,043	4,03
Ratio Potencial de Neutralización (RNP)		11,3	3,54	4,83	1,40	1,17	7,64	16,0	0,05	12,9
Sulfato Total	% S	0,01	0,01	0,02	0,01	0,05	0,02	0,01	0,02	0,01
Sulfuro Total	%	0,01	0,05	0,03	0,16	0,11	0,04	0,01	0,03	0,01

3.1.2 Evaluación de los análisis sobre generación de acidez

La relación entre la razón NP/AP y el contenido de sulfuro en las muestras (TABLA 4) indica que las muestras 2, 3, 4, 5, 6 y 8 presentan generación de

acidez. Los resultados revelan que todas las muestras evaluadas tienen un potencial para generar acidez, según los criterios de calificación NPR y NP/AP.

TABLA 4. Interpretación de los resultados del Test ABA. Fuente: elaboración propia

Muestra	PH pasta	AP	NP	NNP	NP/AP	Sulfuro %	pH NAG	NNP
1	7,28	0,01	0,02	3,22	2,0	0,01	6,04	0,01
2	7,60	0,05	0,06	3,96	1,20	0,05	6,84	0,01
3	7,27	0,03	0,05	3,59	1,17	0,03	6,56	0,02
4	6,00	0,16	0,17	2,02	1,06	0,16	6,86	0,01
5	7,35	0,11	0,16	0,59	1,45	0,11	6,71	0,05
6	7,44	0,04	0,06	8,30	1,50	0,04	6,88	0,05
7	7,53	0,01	0,02	4,71	2,00	0,01	7,95	0,01
8	5,55	0,03	0,05	0,90	1,67	0,03	7,39	0,02
9	7,44	0,01	0,02	3,72	2,00	0,01	7,12	0,01

El consumo de álcali necesario para el NAG hasta pH 4,5 se considera un indicador de la cantidad de ácido libre presente, como H_2SO_4 , junto con hierro y aluminio disueltos que consumen álcali para formar hidróxidos. La obtención hasta pH 7,0 refleja la acidez resultante del consumo de material neutralizante por reacciones de hidroxilación de iones metálicos, que precipitan como hidróxidos en el rango de pH de 4,5 a 7,0. Las figuras correspondientes al criterio NP/AP y la correlación NP/AP-%S, indican que las muestras estudiadas son materiales generadores de acidez ($NP/AP < 1$ y $\%S > 0,3$).

3.1.3 Ensayos y discusión del Test NAG

El Test de Celda Húmeda (TCH) replicó en el laboratorio el proceso natural de meteorización y oxidación de rocas y minerales expuestos a la intemperie dentro de instalaciones mineras. Los valores de pH medidos después de 24 horas permitieron clasificar los materiales como potenciales generadores de acidez, considerando el pH final menor a 4,5 unidades (Canmet, 2009). La prueba NAG (*Neutralization Acid Generation*) midió la cantidad de ácido libre (como el ácido sulfúrico) y el consumo de álcalis para formar hidróxidos de hierro y aluminio, con dos niveles de titulación: hasta pH=4,5 para medir el ácido libre y hasta pH=7 para evaluar la acidez resultante de la neutralización (TABLA 5).

TABLA 5. Resultados analíticos NAG. Fuente: elaboración propia

Parámetro	Unidades	BOT-001	BOT-002	BOT-003	BOT-004	BOT-005	BOT-006	BOT-007	BOT-008	BOT-009
NAG (pH 4,5)	kg H_2SO_4/t	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2
NAG (pH 7,0)	kg H_2SO_4/t	0,29	< 0,20	0,39	0,23	1,36	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20
pH NAG	Unidades de pH	6,09	6,84	6,56	6,86	6,71	6,88	7,95	7,39	7,12

Para caracterizar los materiales según el método NAG (TABLA 6), se utilizó la siguiente clasificación (Canmet, 2009):

TABLA 6. Resultados analíticos NAG. elaboración propia

Resultado Prueba NAG	Clasificación
pH NAG <4,5 y NAG >10	Alta generación de acidez
pH NAG >4,5 y 1 < NAG <10	Baja generación de acidez
pH NAG >4,5 y NAG <1	No genera acidez

Se aplicó la tabla de decisiones para la categorización de materiales basada en el Test

estático (TABLA 7), siguiendo la guía metodológica sobre drenaje ácido en la industria minera.

TABLA 7. Tabla de decisiones. Fuente: elaboración propia

PNN		PN/PA	Interpretación
>20		>3	Bajo o nulo potencial de Generación de ácido
<20		1 a 3	Potencial Marginal de generación de ácido
<0		<1	Alto Potencial de Generación de ácido
-20 y 20	Interpretación Dificultosa	Si PN/PA > 3	Bajo Riesgo de formar Drenaje ácido
		Si PN/PA varía de 1 a 3	Zona de Incertidumbre (se recomienda Test Cinético)

Se proporciona una visión detallada de cómo se determinan los potenciales generadores de acidez en los materiales mediante pruebas específicas y su interpretación basada en tablas de decisión.

3.2 Ensayos cinéticos: resultados y discusión

Las pruebas cinéticas realizadas en la zona de estudio tienen como objetivo predecir la generación de drenaje ácido que podría afectar la calidad del agua en fuentes superficiales y subterráneas. Estos ensayos permitieron evaluar el comportamiento geoquímico a través de la disolución de metales. Los parámetros controlados en las pruebas incluyeron pH, conductividad eléctrica, potencial redox, sulfatos, cloruros, nitratos, nitritos, alcalinidad, bicarbonatos, fluoruros, carbonatos y metales disueltos.

Los resultados muestran un rango de pH entre 4,42 y 7,10. La presencia de minerales de hierro contribuye a la disminución del pH; sin embargo, los valores obtenidos no indican una fuerte generación de acidez. La conductividad eléctrica varía desde 80,8 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en la celda de humedad N°7 hasta 14,3 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en la celda N°18, lo que sugiere una disminución de iones disueltos con el tiempo. El potencial Redox, que se mantiene positivo con un promedio de 300 mV, indica que el agente oxidante prevalece sobre el reductor, contribuyendo a la acidificación de las celdas

húmedas. La generación de sulfatos como resultado de la oxidación de minerales sulfuros es mínima, señalando una velocidad de oxidación lenta en las celdas de humedad. La alcalinidad liberada por los carbonatos reduce la generación de ácido debido a la mineralogía de la zona de estudio.

El análisis de metales disueltos muestra concentraciones promedio bajas y dispersas para cada celda de humedad: 0,001 ppm (Al), 0,0025 ppm (Ar), 2,91 ppm (S), 0,047 ppm (B), 4,25 ppm (Ca), 0,13 ppm (Cu), 0,019 ppm (Sr), 0,086 ppm (Fe), 0,61 ppm (Mg), 0,041 ppm (Mn), 0,033 ppm (Pb), 1,43 ppm (K), 20,38 ppm (SiO₂), 0,79 ppm (Na), y 0,0395 ppm (Zn). Estas concentraciones indican una lixiviación limitada de elementos solubles en las celdas de humedad.

En relación con el pH y el tiempo/celda, se observa que en las primeras celdas de lavado (C1, C2, C3, C4, C5, C6), el pH se mantiene entre 6,57 y 7,1. En las celdas C7 a C14, el pH disminuye hasta 4,42, mientras que en las últimas celdas (C19, C20), el pH aumenta a 6,89. Esto indica una lenta generación de acidez, sin considerar los efectos de hidrólisis y precipitación de minerales secundarios presentes en la zona de estudio. La FIGURA 3 ilustra la concentración de metales disueltos en función del pH y el tiempo/celda, confirmando la tendencia de pH y la velocidad de generación de acidez observada en las celdas.

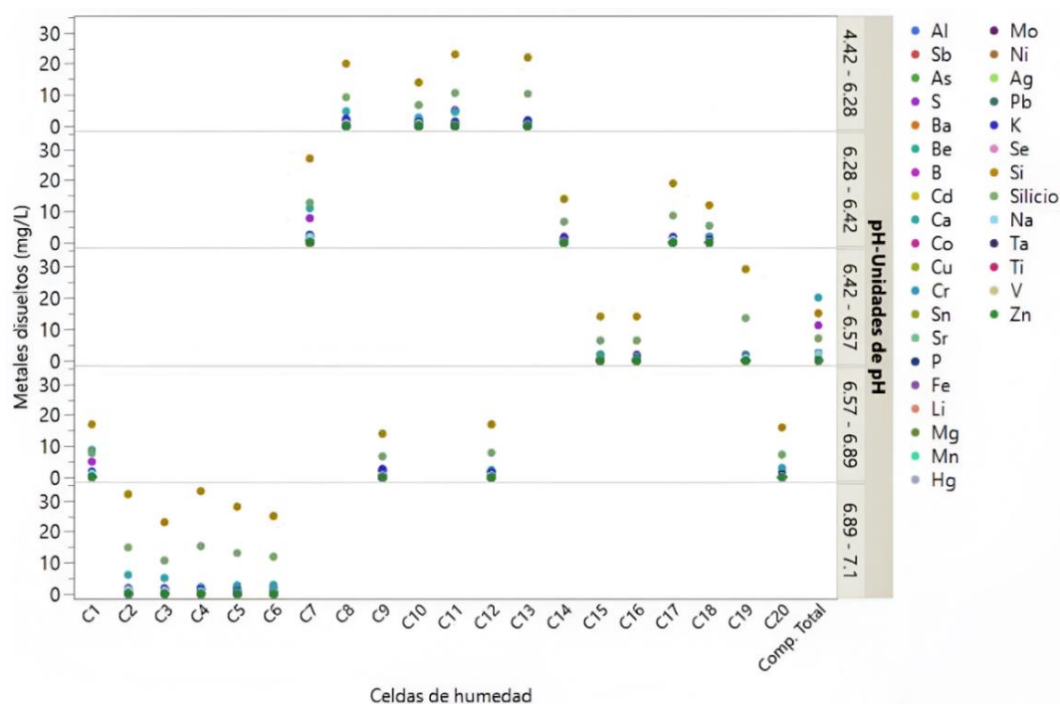


FIGURA 3. Metales disueltos vs pH vs tiempo/celda humedad. Fuente: elaboración propia

3.2.1 Interpretación del resultado de aguas

A) Concentración de aniones

Cloruros: El análisis del contenido de cloruros en las muestras de agua recolectadas revela que los niveles están por debajo del límite máximo permisible de 1000 mg/L para usos de agua en riego y bebida de animales (ECA. 2017).

- Qda. La Zorra: Presenta concentraciones en un rango de 72,3 – 88,6 mg/L.
- Alto Hornillo: Muestra valores de 15,6 mg/L.

Aunque todos los valores están dentro de los límites permisibles, se observa que la concentración de cloruros aumenta desde la zona de Qda. Alto Hornillo hasta Qda. La Zorra. Este incremento se acompaña de niveles de nitratos bajos, con valores de 1,77 mg/L, como se muestra en la FIGURA 4. Las implicaciones

principales en la contaminación residual establecen el aumento en la concentración de cloruros a lo largo del flujo del agua, siendo un indicador de una probable contaminación residual doméstica. Esto se relaciona con la presencia de pequeñas viviendas y zonas cultivadas cerca de las minas, lo que podría ser un indicador potencial de problemas de contaminación microbiológica en el futuro, en cuanto a la concentración de metales, la alcalinidad del agua y la presencia de cloruros podrían influir en la concentración de metales en el agua.

La proximidad a áreas habitadas y cultivadas puede contribuir a estos niveles, sugiriendo la necesidad de un monitoreo continuo para prevenir futuros problemas de contaminación.



FIGURA 4. Contenido de cloruros. Fuente: elaboración

Sulfatos: El análisis del contenido de sulfatos en el área de estudio muestra que, en general, los niveles están por debajo de los límites permitidos por la normativa vigente para aguas (FIGURA 5).

En la Qda. Alto Hornillos: Presenta un contenido de sulfatos de 47 mg/L. *En la Qda. La Zorra:* Muestra una concentración más alta, con valores que oscilan entre 234-254 mg/L. Las implicaciones y causas se evidencian en el incremento de la concentración con la variación en los niveles de sulfatos, con un notable

incremento aguas abajo, se puede atribuir a la presencia de actividades mineras en la zona. Este aumento está asociado a la oxidación de sulfuros, un proceso que genera sulfatos como subproducto.

La FIGURA 6 ilustra este patrón de aumento en la concentración de sulfatos a medida que se avanza desde Qda. Alto Hornillos hacia Qda. La Zorra, confirmando el impacto de la actividad minera en la calidad del agua en esta región.

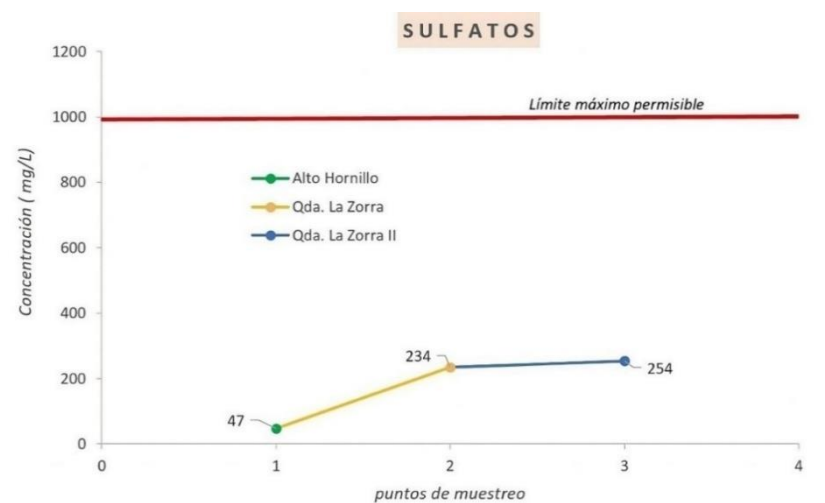


FIGURA 5. Contenido de sulfatos. Fuente: elaboración propia



FIGURA 6. Concentración de aniones y cationes. Fuente: elaboración propia

B) Concentraciones de sodio, calcio y magnesio

Los análisis de los cationes sodio (Na), calcio (Ca) y magnesio (Mg) muestran un patrón de aumento en las concentraciones aguas abajo de la Qda. Alto Hornillos. En la misma zona las

concentraciones de magnesio, calcio y sodio (TABLA 8), aumentan aguas abajo de la Qda. En mención, con los valores más altos registrados en la Qda. La Zorra II.

TABLA 8. Concentración de aniones y cationes en las Qdas. Alto Hornillo y La Zorra. Fuente: elaboración propia

Estación	Unidad	Mg	Ca	Na	Cloruros	Sulfatos
Alto Hornillo	Mg/L	10,7	41,0	21,0	15,6	47,0
Qda. La Zorra	Mg/L	29,1	90,0	49,0	72,3	234,0
Qda. La Zorra II	Mg/L	31,9	96,0	53,0	88,6	254,0

La proporción de los aniones cloruro, sulfato, bicarbonato y de cationes sodio, calcio y magnesio permiten caracterizar la naturaleza de las aguas muestreadas. La concentración de aniones es predominante en comparación con la de cationes en las muestras de agua (FIGURA 6).

Los aniones muestran un aumento notable aguas abajo de la quebrada Alto Hornillos. Este incremento está asociado con la litología y mineralización de la zona, influenciada por las minas Éxodo, Lloque, Espinal, Hornillos y San Antonio. La presencia de minerales en estas minas contribuye a una mayor concentración de aniones en las aguas subterráneas en comparación con las aguas superficiales. El predominio de aniones y su incremento aguas abajo reflejan el impacto de la actividad minera

sobre la calidad del agua, especialmente en las áreas cercanas a las minas. Este fenómeno puede llevar a una mayor concentración de ciertos iones en las aguas subterráneas en relación con las superficiales, lo que debe ser monitoreado para evaluar el potencial impacto ambiental. El diagrama de Piper, nos muestra que el agua resulta ser mayormente de tipo sulfatada cálcica (FIGURA 7).

Los aniones muestran un aumento notable aguas abajo de la quebrada Alto Hornillos. Este incremento está asociado con la litología y mineralización de la zona, influenciada por las minas Éxodo, Lloque, Espinal, Hornillos y San Antonio. La presencia de minerales en estas minas contribuye a una mayor concentración de aniones en las aguas subterráneas en

comparación con las aguas superficiales. El predominio de aniones y su incremento aguas abajo reflejan el impacto de la actividad minera sobre la calidad del agua, especialmente en las áreas cercanas a las minas. Este fenómeno puede llevar a una mayor concentración de ciertos iones

en las aguas subterráneas en relación con las superficiales, lo que debe ser monitoreado para evaluar el potencial impacto ambiental. El diagrama de Piper, nos muestra que el agua resulta ser mayormente de tipo sulfatada cálcica (FIGURA 7).

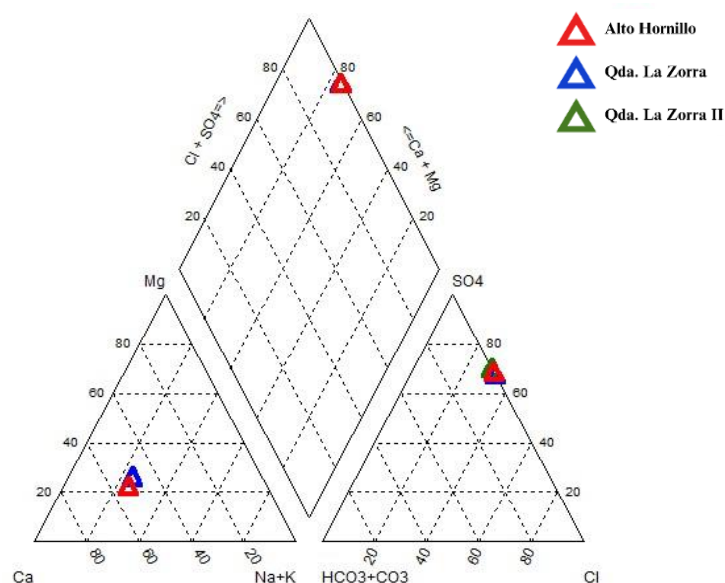


FIGURA 7. Diagrama de Piper. Fuente: elaboración propia

La influencia de las formaciones geológicas predominantes en la zona, son rocas intrusivas, que actúan como agentes de dilución debido a su contenido de sílice y aluminio. Estos minerales pueden mitigar en cierta medida la acidez del agua, y la mineralización de pirita en las rocas puede desencadenar la generación de acidez. La pirita, al descomponerse químicamente en condiciones de superficie, libera elementos que, al interactuar con el agua, provocan cambios en el pH. A pesar de la dilución proporcionada por las formaciones intrusivas, la presencia de pirita en las rocas puede contrarrestar este efecto al liberar ácido.

3.2.2 Concentración de metales totales y disueltos

Las concentraciones de metales totales y disueltos en las muestras de agua de la zona de Alto Hornillos y quebrada La Zorra son muy similares, comparadas con los Estándares de

Calidad Ambiental (ECA) del gobierno peruano. En la zona de la quebrada Zorra II excede los límites máximos permisibles para la categoría 1/A1, con una concentración de sulfatos de 254 mg/L, derivada de sulfuros como consecuencia de la actividad minera. En la cabecera de la cuenca, los valores son menores debido a la dispersión y movilidad aguas abajo hasta la quebrada Zorra II. Las concentraciones de metales tóxicos presentes en el agua no representan un riesgo para los seres vivos en los alrededores de la zona de estudio, ya que están muy por debajo de los límites máximos permisibles.

4. Conclusiones

Se han identificado seis minas abandonadas e informales mediante imágenes satelitales de Perusat-1, cuyos residuos y desmontes amenazan con generar deterioro ambiental y contaminación en las áreas bajas circundantes. Estos desechos

representan un peligro significativo durante las épocas de lluvia, ya que pueden provocar la formación de drenaje ácido y contaminar tanto el agua como el suelo. Las minas se encuentran dentro de la red hidrográfica de la quebrada La Zorra, lo que podría afectar el subsuelo, el nivel freático y las aguas utilizadas por los habitantes locales.

Las muestras, de acuerdo con las tablas NPR y NP/AP, indican una posible generación de acidez. Los ensayos cinéticos y estáticos confirman estos resultados, mostrando variaciones de pH entre 4,42 y 7,10, con una disminución del pH debido a la presencia de minerales de hierro, aunque no se identificó una fuente significativa de generación de ácido. El análisis de metales disueltos revela bajos niveles de concentración y dispersión,

sugiriendo una lixiviación mínima en las celdas de humedad. Los ensayos estáticos de nueve muestras indican generación de acidez en la mayoría de ellas. En las celdas de humedad C1 a C6, el pH se mantiene entre 6,57 y 7,1, mientras que en las celdas 7 a 14 disminuye a 4,2, y en las celdas 19 y 20 se observa un ligero aumento del pH a 6,89, con una lenta generación de acidez.

Las concentraciones de cloruros y sulfatos están por debajo de los límites máximos permisibles, pero presentan variaciones a lo largo de las quebradas muestreadas. Aguas abajo de la quebrada Alto Hornillos, las concentraciones de sodio, calcio y magnesio aumentan, al igual que las concentraciones de metales totales y disueltos, que son similares en las zonas de Alto Hornillos y quebrada La Zorra.

5. Agradecimientos

Agradecimiento especial a la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa por el financiamiento del proyecto de investigación *IBAIB-01-2018-UNSA*, por ceder el tiempo para la culminación de este estudio, como producción académica derivada de la labor docente.

6. Referencias citadas

AGUILAR, R.; THOURET, J. y P. SAMANIEGO. 2016. Actividad eruptiva en sistemas de larga duración, relaciones entre el complejo post-caldérico Chachani y las ignimbritas Plio-cuaternarias de la cuenca de Arequipa. *Resúmenes*. Sociedad Geológica del Perú, Lima. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.12544/1597>.

CANMET MINING and MINERAL SCIENCES LABORATORIES. 2009. *Prediction Manual for Drainage Chemistry from Sulphidic Geologic Materials*. MEND Report 1.20.1. Ministry of Natural Resources Ottawa, Canada.

CIMM T & S S.A. 2007. *Aplicación de test ABA y evaluación de generación neta de acidez a muestras de geología de Compañía Minera del Pacífico*. Informe Final. Santiago de Chile.

COBBING, E. & W. PITCHER. 1983. "Andean plutonism in Peru and its relationship to volcanism and metallogenesis at a segmented plate edge". En: RODDICK, J.A. (Ed.), *Circum-Pacific plutonic terranes*. Geological Society of America, Memoir 159, Boulder, Colorado, pp. 277-291. Disponible en: <https://doi.org/10.1130/MEM159-p277>.

CHÁVEZ, A. 1982. *Estratigráfica y tectónica del sector de Chapi (departamento de Arequipa y de Moquegua)*. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa. Perú. Tesis doctoral.

DOS SANTOS, K.; GÓMEZ BARREIRO, J. y S. BARRIOS. 2020. *El placer aurífero del arroyo Fresnedoso (Perales del Puerto, Cáceres, España)*. Informe técnico no publicado. Disponible en: <https://drive.google.com/file/d/10g9EEM-ukfyD-cBoP1Qdu0mBsicKN8O/view?pli=1>.

GARCÍA, S. 2013. *Modelación del potencial de drenaje ácido de botaderos: calibración a partir de celdas húmedas y granulometría*. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Santiago de Chile. Memoria de Título de Geólogo. Disponible en: <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/113400>.

ESTANDARES DE CALIDAD AMBIENTAL (ECA). 2017. *Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM: Estándares de Calidad Ambiental para aguas*. Lima, Perú. Disponible en: <https://www.gob.pe/institucion/minam/normas-legales/3671-004-2017-minam>.

KANIA, T. 1998. "Métodos de laboratorio para la contabilidad ácido-base: una actualización". En: *La predicción del drenaje de minas de carbón y la prevención de la contaminación en Pennsylvania*, capítulo 6, pp. 15-16. Ingeoexpert. España.

LÓPEZ, E.; ADUVIRE, O. y D. BARETTINO. 2002. "Tratamientos pasivos de drenajes ácidos de mina: estado actual y perspectivas de futuro". *Boletín Geológico y Minero*, 113(1): 3-21. Disponible en: https://www.igme.es/Boletin/2002/113_1_2002/4-articulo%20tratamientos.pdf.

NAVONE, S. M. 2003. *Sensores remotos aplicados al estudio de los recursos naturales*. Universidad de Buenos Aires (UBA), Buenos Aires, Argentina.

PINO, A.; SEMPETE, T.; JACAY, J. y M. FORNARI. 2004. "Estratigrafía, paleogeografía y paleotectónica del intervalo Paleozoico superior-Cretáceo inferior en el área de Mal Paso-Palca (Tacna)". En: *Nuevas contribuciones del IRD y sus contrapartes al conocimiento geológico del sur del Perú*. Publicación Especial N° 5, pp. 15-44. Sociedad Geológica del Perú Lima.

PITCHER, W. 1985. "A multiple and composite batholith". En: W. Pitcher (ed.), *Magmatism at a plate edge. The Peruvian Andes*, pp. 243-249. John Wiley and Sons Inc. New York, USA.

PRICE, B. y E. ERRINGTON. 1997. *Guía sobre lixiviación de metales y drenaje ácido de la minería en la Columbia Británica*. British Columbia Ministry of Energy and Mines. Canada.

ROBERTSON, A. M. & J. P. BARTON-BRIDGES. 1990. Cost effective methods of long-term acid mine drainage control from waste rock piles. *Design for Closure-Proceedings of the GAC-MAC Conference*, Vancouver, B.C., Canada.

SMART, R.; SKINNER, W.; LEVAY, G.; GERSON, A.; THOMAS, J. SOBIERAJ, H.; ... y M. Miller. 2002. *Manual de prueba ARD: predicción del proyecto P387A y control cinético del drenaje ácido de minas*. Songor Carrión 79. AMIRA, I.

ZAMORA, G. y M. BENZAAZOUA. 2003. "Predicciones de drenaje ácido de roca mediante test geoquímicos estáticos y dinámicos". *Revista Metalúrgica UTO*, 24: 513.

Lugar y fecha de finalización del artículo:
Arequipa, Perú; octubre, 2025