

Assessment of Groundwater Quality in Artisanal and Small-Scale Gold Mining (ASGM) Communities in Quimistán, Santa Bárbara-Honduras

Palacios Ordenes, Rodrigo Alejandro¹ 

^{1,3}Centro Universitario Tecnológico, Universidad Tecnológica Centroamericana, Tegucigalpa, Honduras.
rodrigopalacios@unitec.edu

Abstract: Artisanal and Small-Scale Gold Mining (ASGM) in Quimistán, Santa Bárbara, Honduras, occurs within a geological setting dominated by metamorphic rocks and hydrothermal gold systems naturally associated with potentially toxic elements such as arsenic (As). In this context, amalgamation with mercury and the reprocessing of tailings through cyanide leaching represent additional pressures on the aquifers used by the communities of Santa Cruz Minas and La Mina for human consumption, domestic activities, agriculture, livestock, and mining processes.

To establish a groundwater quality baseline, a sampling campaign was conducted during the 2025 rainy season in 17 water supply sources. Total, free, and WAD cyanide, environmentally relevant metals and metalloids, and physicochemical parameters were analyzed, followed by the application of a Water Quality Index (WQI) adapted to ASGM contexts.

The results revealed heterogeneous groundwater quality conditions: one source exhibited good quality, eleven regular quality, four marginal quality, and one poor quality. Arsenic concentrations exceeded permissible limits at several sites (0.02–2.456 mg/L), in addition to elevated nickel concentrations (0.03–0.09 mg/L) and electrical conductivity values (503–1748 $\mu\text{S}/\text{cm}$), indicating both geogenic mineralization processes and possible anthropogenic influence associated with ore processing activities.

Overall, the findings highlight the interaction between geogenic factors and ASGM-related activities and emphasize the need for systematic monitoring, water treatment measures, and preventive environmental management strategies in territories with similar geological and mining conditions.

Keywords: ASGM, Arsenic, Clean Water and Sanitation, Minamata, Water Quality Index

Valoración de la Calidad de Agua Subterránea en comunidades MAPE de Oro de Quimistán, Santa Bárbara-Honduras

Palacios Ordenes, Rodrigo Alejandro¹ 

^{1,3}Centro Universitario Tecnológico, Universidad Tecnológica Centroamericana, Tegucigalpa, Honduras.

rodrigopalacios@unitec.edu

Resumen: La Minería Artesanal y en Pequeña Escala (MAPE) de oro en Quimistán, Santa Bárbara, Honduras, se desarrolla en un contexto geológico dominado por rocas metamórficas y sistemas hidrotermales auríferos asociados naturalmente con elementos potencialmente tóxicos, como el arsénico (As). En este escenario, las actividades de amalgamación con mercurio y el reprocesamiento de relaves mediante lixiviación con compuestos cianurados representan una presión adicional sobre los acuíferos utilizados por las comunidades de Santa Cruz Minas y La Mina para consumo humano, actividades domésticas, agropecuarias y procesos mineros.

Con el objetivo de establecer una línea base de la calidad del agua subterránea, durante la época lluviosa de 2025 se realizó un muestreo en 17 fuentes de abastecimiento. Se analizaron cianuro total, libre y WAD, metales y metaloides de interés ambiental, así como parámetros fisicoquímicos, aplicando posteriormente un Índice de Calidad de Agua (ICA) adaptado a contextos MAPE.

Los resultados evidenciaron una calidad heterogénea del recurso hídrico: una fuente presentó calidad buena, once calidad regular, cuatro calidad marginal y una calidad pobre. Se identificaron concentraciones de As superiores a los valores máximos admisibles en múltiples sitios (0.02–2.456 mg/L), además de excedencias de níquel (0.03–0.09 mg/L) y conductividad eléctrica (503–1748 $\mu\text{S}/\text{cm}$), indicando procesos de mineralización y posible influencia antrópica asociada al beneficiado minero.

En conjunto, los hallazgos reflejan la interacción entre factores geogénicos y actividades MAPE, y resaltan la necesidad de monitoreo sistemático, medidas de potabilización y estrategias preventivas de gestión ambiental en territorios con condiciones geológicas y mineras similares.

Palabras clave: Agua Limpia y Saneamiento, Arsénico, Índice de Calidad de Agua, MAPE de oro, Minamata.

I. INTRODUCCIÓN

La Minería Artesanal y en Pequeña Escala (MAPE) de oro constituye una actividad económica relevante en América Latina y en Honduras, pero también una fuente potencial de presión ambiental sobre los recursos hídricos subterráneos. En el municipio de Quimistán, departamento de Santa Bárbara, esta actividad se desarrolla a lo largo de una cadena de valor que incluye la extracción del mineral, el acarreo, el beneficiado en rastras mediante amalgamación con mercurio, la quema de

amalgama y el reprocesamiento de relaves mediante lixiviación con compuestos cianurados. Estas prácticas, ejecutadas mayoritariamente bajo esquemas informales y con limitada regulación, pueden incumplir disposiciones internacionales como el Convenio de Minamata sobre el Mercurio y favorecer la liberación y movilización de metales, metaloides y cianuro en el ambiente [1] [2].

Además, el uso de mercurio (Hg) y cianuro (CN) en el sector MAPE no solo representan un riesgo para el ambiente, sino que también para la salud y seguridad ocupacional de mineros, operadores de molinos artesanales (rastras), y operadores de pilas de lixiviación, que son los que mayormente se ven expuestos a Hg y CN; puesto que, al no tener esquemas de explotación minera formales, carecen de un control y seguimiento por las autoridad minera y ambiental de Honduras [3].

En las aldeas de Santa Cruz Minas y La Mina, las comunidades dependen principalmente del agua subterránea para consumo humano y animal, uso doméstico, actividades agropecuarias y procesos asociados al beneficiado de oro. Diversas fuentes de abastecimiento se localizan aguas abajo de pilas de lixiviación y otras infraestructuras mineras, en un contexto caracterizado por una alta informalidad del sector, escasa supervisión institucional y ausencia de medidas sistemáticas de mitigación ambiental. A pesar de la prolongada historia minera de la zona, los estudios realizados han priorizado la prospección y caracterización de recursos minerales, existiendo una marcada carencia de evaluaciones hidrogeoquímicas orientadas a caracterizar la calidad del agua subterránea y los riesgos asociados a la exposición crónica a contaminantes de origen geogénico y antrópico.

En este contexto, el presente estudio tiene como objetivo establecer una línea base integral de la calidad del agua subterránea en las aldeas de Santa Cruz Minas y La Mina, mediante el análisis de cianuro total, libre y WAD, metales (Al, Ba, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mg, Mn, Ni, Pb, Zn), el metaloide arsénico (As) y el no metal selenio (Se), y parámetros fisicoquímicos como pH, temperatura, conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales (TDS) y potencial oxidación-reducción (ORP). así como la aplicación de un Índice de Calidad de Agua (ICA). Particularmente, evaluar el estado de la calidad del agua con enfoques tradicionales no asegura una comprensión general de la situación de la calidad del agua, por consiguiente; el desarrollo de una herramienta como el ICA, que convierte múltiples parámetros en información que puede resultar ser

Esta investigación constituye uno de los primeros antecedentes de este tipo en la zona y busca generar información científica confiable que sirva como base para la gestión ambiental y sanitaria, así como para el desarrollo de estrategias preventivas y replicables en territorios con presencia de MAPE y condiciones geológicas similares

La investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo de alcance descriptivo-analítico, orientado a la evaluación de la calidad del agua subterránea en zonas influenciadas por actividades de Minería Artesanal y en Pequeña Escala (MAPE) de oro. El estudio se llevó a cabo durante la época lluviosa (septiembre de 2025) en las aldeas de Santa Cruz Minas y La Mina, municipio de Quimistán, departamento de Santa Bárbara, Honduras (Fig. 1).

Fig. 1:Ubicación geográfica del área de estudio.

La selección de los puntos de muestreo se realizó a partir de un censo previo de fuentes de agua subterránea, elaborado con el apoyo de mineros de la Cooperativa Mixta “Los Túneles de las Minas Limitada” (COTUML). Dicho censo identificó un total de 18 fuentes, considerando como criterios de selección aquellas de uso comunitario, y las ubicadas próximas o aguas abajo de pilas de lixiviación de relaves contaminados con Hg. Conforme al diseño del estudio y el presupuesto, se muestrearon 17 fuentes de agua subterránea, de las cuales 16 corresponden a fuentes operativas del censo, y una adicional identificada durante el muestreo, distribuidas en: pozos excavados (malacate) y manantiales con infraestructura de captación y bombeo, utilizados para consumo humano, actividades domésticas, agricultura, ganadería y procesos de beneficiado de la MAPE (Fig. 2 y Fig. 3). En la TABLA 1 se observa el uso de las fuentes de agua muestreadas.

Código	Aldea	Coordenada X	Coordenada Y	Uso
HM	La Mina	359108	1698837	Vivienda
MD		359404	1698959	Cría de tilapia y piscinas
JL	Santa Cruz Minas	359906	1699537	Venta de agua
MR		360268	1699190	Vivienda
BL		360295	1699342	
ML		360201	1699076	
MM		360468	1699141	
LE		360540	1699418	Limpieza de vivienda
EM1		360386	1699716	Doméstico
EM2		360229	1700069	Ganado
AM		360315	1700494	Cría de pollos, ganado y riego
RN		360977	1701094	Operación de rastras y pilas de lixiviación
SM	La Mina	360285	1699945	Operación de rastras
RD		360392	1699919	Vivienda
ES		360734	1699968	Ganadería
EM		360927	1700857	Operación de rastras, y pilas de lixiviación
ATM		359121	1698588	Ganadería y vivienda

Adicionalmente, en paralelo al censo hídrico se llevó a cabo un censo de pilas de lixiviación en las mismas aldeas, teniendo un total de 98 pilas de lixiviación censadas, como se observa en la figura 2.



Fig. 2: Pilas de lixiviación artesanales ubicada en aldea Santa Cruz.

El estudio fue diseñado como una línea base desarrollada durante la época lluviosa, considerando condiciones de recarga hídrica y disponibilidad de fuentes. No obstante, la variabilidad hidrogeoquímica estacional puede influir significativamente en la dinámica de los contaminantes, particularmente en la concentración y movilidad de metales y cianuro. Durante la época lluviosa, los procesos de dilución, recarga y movilización pueden modificar las concentraciones observadas, potencialmente generando valores menores en comparación con condiciones de estiaje, donde predominan procesos de concentración. En este contexto, se reconoce como limitación la ausencia de datos en época seca, por lo que se recomienda la replicación del muestreo bajo dichas condiciones, a fin de lograr una caracterización hidrogeoquímica más completa y una mejor comprensión de la variabilidad estacional del sistema.

Durante el muestreo se determinaron in situ los parámetros fisicoquímicos de temperatura, pH, conductividad eléctrica, potencial óxido-reducción (ORP) y sólidos disueltos totales (TDS), utilizando un equipo multiparamétrico HANNA HI 9829. Las muestras fueron posteriormente analizadas para la determinación de cianuro total, libre y WAD mediante el método UV-Visible con diálisis gaseosa, así como de metales, metaloides y otros elementos de interés mediante espectroscopía de emisión óptica con plasma acoplado inductivamente (ICP-OES) en el laboratorio del Instituto Hondureño de Geología y Minas (INHGEOMIN).



Fig. 3: Manantial con estructura de captación en aldea La Mina.

B. Valoración de la calidad de agua subterránea a partir de un Índice de Calidad de Agua

Para la valoración preliminar de la calidad de aguas subterráneas, se utilizaron las guías del Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME) [5] este propone un Índice de Calidad de Agua (ICA), el cual se ha utilizado ampliamente desde el 2001 en Canadá y a través de todo el mundo, para reportar el estado de la calidad del agua. El índice propuesto se caracteriza por su facilidad de cálculo y alta flexibilidad, lo que permite su aplicación en diversos contextos y para múltiples usos del agua, incluyendo el análisis de los resultados obtenidos durante la campaña de muestreo en época lluviosa. Este enfoque se fundamenta en metodologías adoptadas por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, tales como el Índice Global de Agua para Consumo, el Índice de Calidad de Agua para la Salud y el Índice de Aceptabilidad de la Calidad del Agua, los cuales han sido aplicados en países de África, América, Asia y Europa. En este marco, el estudio plantea la adaptación de un Índice de Calidad de Agua (ICA) específico para zonas influenciadas por la MAPE, incorporando tanto los procesos químicos asociados al beneficiado de minerales como los parámetros geoquímicos derivados de las mineralizaciones propias del contexto geológico local de Quimistán.

El ICA considera el alcance, frecuencia y amplitud, respecto a las desviaciones de las guías de calidad. En ese sentido, se utilizó como base: La Norma Técnica para Calidad del Agua Potable de Honduras [6], Normativa del Parlamento Europeo & Consejo de la Unión Europea [7], y Organización Mundial de la Salud [8].

A partir de las directrices del CCME, el cálculo del índice se realizó de acuerdo con las fórmulas del ICA, establecidas por Canadian Council of Ministers of the Environment [5]. A continuación, se detallan las ecuaciones utilizadas y la descripción del indicador que mide cada una dentro del cálculo del Índice:

1. El número de parámetros que pertenecen a una normativa y no la cumplen corresponde al alcance. Este indicador representa el porcentaje de parámetros que por lo menos una vez no cumplen la normativa, y se consideran como “parámetros fallidos”, en relación con el número total de parámetros medidos, como muestra en la ecuación (1)

$$F_1 = \left(\frac{\text{Número de parámetros fallidos}}{\text{Número total de parámetros}} \right) \times 100 \quad (1)$$

2. La frecuencia con la que esos parámetros no cumplen (frecuencia). Esta representa el porcentaje de pruebas individuales que se encuentran fuera de los Valores Máximos Admisibles durante la temporalidad del muestreo. Para esta medición se utiliza la ecuación (2).

$$F_2 = \left(\frac{\text{Número de parámetros fallidos}}{\text{Número total de análisis}} \right) \times 100$$

(2)

3. La cantidad en la que no se cumplen (amplitud). Esta determina el exceso de los datos fuera de rango, al acompañarlos por su umbral y se calcula en tres pasos:
 - i. El número de veces que una concentración individual es mayor que lo sugerido en una norma técnica (o menor en el caso que establezca un valor mínimo), y se utiliza el término excursión. Cuando la prueba no excede el valor de la norma técnica se calcula como:

$$\text{Excursión}_i = \left(\frac{\text{Valor de la prueba fallida}}{\text{Objetivo}} \right) - 1$$

(3)

Para los casos en que el valor de prueba no cabe por debajo de la Norma Técnica:

$$\text{Excursión}_i = \left(\frac{\text{Objetivo}}{\text{Valor de la prueba fallida}} \right) - 1$$

(4)

- ii. Suma normalizada de las excursiones

$$\text{sne} = \frac{\sum_{i=1}^n \text{excursión}_i}{\# \text{ de pruebas}} \quad (5)$$

- iii. Fórmula para el cálculo de amplitud:

$$F_3 = \frac{\text{sne}}{0.01 \times \text{sne} + 0.01} \quad (6)$$

4. Una vez encontradas las tres variables (alcance, frecuencia y amplitud) se procede a calcular el ICA con la ecuación (7):

$$\text{CCME}_{\text{ICA}} = 100 - \left(\frac{\sqrt{F_1^2 + F_2^2 + F_3^2}}{1.732} \right) \quad (7)$$

El divisor 1.732 normaliza los valores resultantes a un rango entre 0 y 100.

El uso del ICA representa una ventaja metodológica relevante al permitir una evaluación integrada, objetiva y comparable de la calidad del agua subterránea frente a múltiples parámetros fisicoquímicos y químicos. A diferencia de enfoques uniparamétricos, el ICA sintetiza simultáneamente la frecuencia, magnitud y número de incumplimientos respecto a valores guía normativos, proporcionando una medida robusta del grado real de deterioro del recurso hídrico. Esta característica resulta particularmente adecuada en contextos MAPE donde coexisten presiones antrópicas y condiciones geogénicas naturales, como la presencia de arsénico asociado a sistemas hidrotermales. Además, su flexibilidad para adaptarse a normativas locales y su amplia aceptación internacional facilitan la comparación de resultados entre estudios y regiones,

fortaleciendo la interpretación técnica y la utilidad del índice como herramienta de apoyo a la gestión ambiental y la toma de decisiones en zonas con actividad minera.

C. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como resultado del análisis se generó una línea base de la calidad del agua subterránea en las aldeas de La Mina y Santa Cruz Minas, en un contexto donde las actividades de la MAPE se desarrollan sin antecedentes sistemáticos de monitoreo ambiental. Si bien una línea base idealmente se establece previo a la ocurrencia de impactos ambientales negativos y/o positivos, en este caso el estudio constituye un punto de partida técnico para caracterizar el estado actual del recurso hídrico en una zona con presiones históricas derivadas de actividades extractivas y de beneficiado.

Al finalizar el estudio, se pudo determinar que, como se observa en la TABLA II, de las 17 fuentes de agua subterránea analizadas, únicamente 1 muestra tuvo una calidad buena; 11 muestras una calidad regular; 4 una calidad marginal y 1 muestra una calidad pobre; es necesario analizar algunos de los elementos que se utilizaron para el cálculo de excursiones, puesto que estos elementos son los que están por encima de los valores máximos admisibles, y son los que deben de tomarse en cuenta para procesos de potabilización.

Sin embargo, el ICA presenta una desventaja, y es que pese a que resultados clasificados como buenos o regulares, podrían interpretarse como calidad de agua óptima para consumo humano; este no es el caso, ya que la excedencia en valores máximos admisibles de elementos como el Arsénico (As), en un sitio clasificado con calidad buena, representa una amenaza para la salud, y debe ser considerada una alerta para su consumo y uso.

En concordancia con el planteamiento anterior, se deben de analizar las excedencias a los valores máximos admisibles por cada sitio, y determinar si dichas excedencias representan un riesgo para la salud, antes de solo utilizar como una guía la clasificación de la calidad.

Para el cálculo del ICA se consideraron los metales Al, Ba, Ca, Co, Cr, Cu, Fe, Mg, Mn, Ni y Zn, además del metaloide arsénico (As), junto con los parámetros fisicoquímicos evaluados conforme a los valores máximos admisibles establecidos en la normativa aplicable. Sin embargo, Cd, Pb, Se y la especiación de cianuro analizadas no fueron incorporados dentro del cálculo del índice, debido a que los límites de detección del equipo para dichos analitos son superiores a sus respectivos valores máximos admisibles, lo que impide determinar con certeza si sus concentraciones reales representan o no un riesgo de contaminación. Asimismo, la temperatura, TDS, y ORP, fueron evaluados únicamente como parámetros fisico-operacionales y de interpretación hidrogeoquímica, ya que la normativa [6] no establece valores máximos admisibles para estos parámetros.

TABLA II
RESULTADOS DEL ICA Y CLASIFICACIÓN

Código	Valor ICA	Clasificación
MR	85.9	Buena
JL	84.83	Regular
ATM	80.24	Regular
RN	78.45	Regular
HM	73.18	Regular
MM	70.19	Regular
MD	69.88	Regular
ES	69.43	Regular
EM2	68.71	Regular
EM1	68.03	Regular
ATM	65.24	Regular
RD	65.22	Regular
ML	63.37	Marginal
LE	63.01	Marginal
SM	60.73	Marginal
BL	57.02	Marginal
EM	37.66	Pobre

Para facilitar la comprensión de los resultados del ICA, se presentan 4 grupos, los cuales se enfocan en la influencia de elementos o actividad minera, en la calidad del agua, como se detalla a continuación:

I. Grupo 1: Sitios con presencia elevada de arsénico (origen geogénico dominante)

Sitios incluidos:

- HM (ICA = 73.18)
- MD (ICA = 69.88)
- ML (ICA = 63.37)
- SM (ICA = 60.73)
- EM1 (ICA = 68.03)
- AM (ICA = 65.24)

En este grupo, los valores de ICA se sitúan mayoritariamente en la categoría Regular a Marginal, lo cual es

coherente con la presencia de As en concentraciones superiores al valor máximo admisible (0.01 mg/L), con registros que alcanzan hasta 0.134 mg/L. A pesar de que algunos sitios presentan ICA cercanos al límite superior de la categoría Regular (ej. HM), la presencia de As constituye un factor limitante para la calidad del agua, especialmente en aquellos sitios destinados a consumo humano.

II. Grupo 2: Sitios con dureza elevada del agua asociada a Ca-Mg

Sitios incluidos:

- MM (ICA = 70.19)
- LE (ICA = 63.01)
- MD (ICA = 69.88)
- EM2 (ICA = 68.71)
- SM (ICA = 60.73)

Los sitios de este grupo presentan valores de ICA entre 60.73 y 70.19, correspondientes a calidades regulares a marginales. Las elevadas concentraciones de calcio (hasta 177.60 mg/L) y magnesio (hasta 67.23 mg/L) influyen negativamente en el índice, no por toxicidad directa, sino por afectar propiedades fisicoquímicas del agua, como la dureza, lo que repercute en su aptitud para usos domésticos y agropecuarios.

III. Grupo 3: Sitios con metales asociados a pH bajo y movilización secundaria (Al, Fe, Ni)

Sitios incluidos:

- MR (ICA = 85.90)
- JL (ICA = 84.83)
- ATM (ICA = 80.24)
- RN (ICA = 78.45)
- BL (ICA = 57.02)
- ES (ICA = 69.43)

Este grupo presenta una mayor dispersión en los valores de ICA, que van desde Buena (MR) hasta Marginal (BL). Aun cuando algunos sitios mantienen ICA elevados, la presencia de Al, Fe y Ni en concentraciones superiores a los valores máximos admisibles evidencia que el ICA puede enmascarar riesgos específicos, particularmente cuando las excedencias se concentran en metales sensibles al pH. El caso de BL, con un ICA de 57.02, refleja de manera más directa el impacto de estas excedencias en la calidad global del agua.

IV. Grupo 4: Sitios directamente influenciados por actividad minera

Sitios incluidos:

- RD (ICA = 65.22)
- EM (ICA = 37.66)

Los valores de ICA obtenidos en este grupo evidencian la peor calidad de agua del estudio. El sitio EM, con un ICA de 37.66, se clasifica como Pobre, lo cual es consistente con la presencia extremadamente elevada de arsénico (2.456 mg/L), además de Ca y Fe por encima de los valores admisibles. El sitio RD, aunque clasificado como Regular, presenta múltiples

excedencias, lo que indica que la actividad minera artesanal tiene un impacto significativo y diferenciado sobre la calidad del recurso hídrico.

La incorporación del ICA a través de una categorización grupal, evidencia que los valores asociados con calidad del agua aceptables no siempre garantizan que no existe contaminación del recurso hídrico, ya sea de origen antropogénico o de origen geogénico como el As, el cual puede llegar a tener impactos negativos significativos en la salud, ante un consumo crónico de agua subterránea con la presencia de este elemento.

Uno de las principales enfermedades derivadas del consumo crónico de agua con elevadas concentraciones de As es la arsenicosis, la cual inicialmente se manifiesta por melanosis que ocurre en todo el cuerpo, y si existe endurecimiento de las manchas, puede producir queratosis [9]. Además, otros efectos relacionados con la ingesta de As incluyen fallo cardíaco, anormalidades en cromosomas, cirrosis, diabetes mellitus, hipertensión, cánceres de piel, hepatomegalia o agrandamiento de hígado, entre otras [10].

Debido a que el As es un elemento de interés presente por la geología local, el cual se asocia con la presencia de Au, ya sea que se haya generado por fluidos hidrotermales, o por procesos metamórficos (alta presión y temperatura). Se puede correlacionar el pH y el ORP, de los sitios que presentan valores por encima del valor máximo admisible, para determinar la posible especiación en la cual se puede encontrar el As diluido en el agua subterránea. Como se presenta en la TABLA III y figura 4.

TABLA III
SITIO, PH Y ORP, DE FUENTES DONDE SE EXCEDE EL VALOR MÁXIMO ADMISIBLE DE AS

Código	pH	ORP (mV) medido	Eh (mV) calculado
HM	6.76	20	230
MD	6.48	48.2	258.2
ML	7.26	35.7	245.7
EM1	7.33	35.5	245.5
SM	6.97	31.5	241.5
RD	6.82	31.8	241.8
EM	7.96	32.1	242.1
ATM	7.12	32.2	242.2

El potencial Eh fue estimado a partir de valores ORP medidos en campo, corrigiendo mediante un electrodo de referencia Ag/AgCl (+210 mV vs SHE).

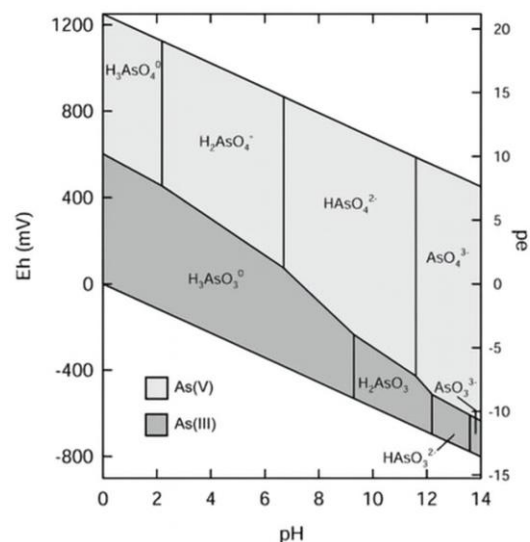


Fig. 4:Diagrama Eh-pH para As inorgánico [11].

Tomando en consideración el planteamiento respecto a la estimación el Eh, y el diagrama de la Fig. 4, se emplearon los valores de pH (6.48-7.96) y los calculados de Eh (+230 a +258mV vs SHE) se observa que las muestras se ubican en el campo de estabilidad del As(V) en el diagrama de Eh-pH. Esto corresponde a condiciones de un ambiente ligeramente oxidante, donde predominan especies como $H_2AsO_4^-$ y $HAsO_4^{2-}$. Este enfoque permite tener una aproximación termodinámica de la especiación del AS en agua, sin embargo; puede no representar la realidad del medio, y para determinar con precisión, se requiere un análisis de especiación, los cuales no se encuentran disponibles a nivel nacional.

En cuanto a la remoción de elementos químicos que superan los valores máximos admisibles en agua subterránea, con énfasis en el arsénico (As) y el níquel (Ni), se propone: Para el caso del As, destacan los métodos precipitativos, los cuales permiten transformar el arsénico disuelto en fases sólidas más fácilmente removibles mediante procesos unitarios como coagulación, sorción y co-precipitación. Estos métodos presentan mayor efectividad para la remoción de As(V) y menor eficiencia para As (III), por lo que resulta fundamental conocer la especiación del arsénico antes de seleccionar un sistema de potabilización [11].

En cuanto al níquel, se recomienda la aplicación de resinas quelantes mediante procesos de intercambio iónico, las cuales han demostrado eficiencias de remoción entre 83.5 % y 90 %. Alternativamente, también pueden emplearse otros materiales adsorbentes, dependiendo de las características fisicoquímicas del agua y de la factibilidad técnica y económica del tratamiento [12]. La selección del método más adecuado debe considerar tanto la concentración del contaminante como el uso previsto del agua y las condiciones locales de operación.

Los resultados obtenidos permiten dar respuesta a las principales preguntas de investigación del estudio. En relación con la posible filtración de soluciones cianuradas hacia el agua

subterránea, las concentraciones de cianuro total, libre y WAD registradas fueron inferiores a 0.05 mg/L, por debajo del Valor Máximo Admisible (0.07 mg/L) establecido en la Norma Técnica para Calidad de Agua Potable [6]. Estos resultados indican que, al momento del muestreo, no se evidencia contaminación del acuífero por cianuro; no obstante, debido al límite de detección analítica (<0.05 mg/L), no es posible descartar completamente la existencia de aportes en concentraciones traza. A comparación de los resultados de una zona minera localizada en Arequipa-Perú [13], en el agua de decantación del proceso de cianuración, se determinaron concentraciones de metales como: cobre (394 ± 161 mg/L), hierro (59 ± 34 mg/L), y zinc (74 ± 42 mg/L). Además, en el agua de decantación la media de cianuro libre y completos fueron: 534 ± 129 mg/L y 805 ± 297 mg/L, respectivamente. Además, las concentraciones de complejos de cianuro se mantuvieron más constantes que las concentraciones de CN libre, con concentraciones de 786 ± 299 mg/L y para el agua de reciclaje y 805 ± 297 mg/L para el agua de decantación; demostrando que los resultados del presente estudio evidencian una mejor calidad del agua, en comparación con los elementos previamente mencionados en una zona minera.

Es importante recalcar que la aplicación del ICA puede tender a la pérdida de información sobre parámetros específicos cuando se analiza de manera general por cada sitio solo con la clasificación generada, y no permite que se pueda evaluar para todos los usos, sino específicamente para los usos que se contemplaron, cuando se determinó el marco normativo para los valores máximos o mínimos admisibles [4].

También, es preciso mencionar que, de los 17 sitios, solamente MD no excede el máximo admisible para conductividad ($400 \mu\text{S}/\text{cm}$), el resto se excede con valores de hasta $1748 \mu\text{S}/\text{cm}$. Esto puede estar asociado a la disolución y movilización de sales y minerales en el agua subterránea, favorecida por procesos de infiltración y recarga durante la época lluviosa, hasta llegar a formar parte del acuífero.

En relación con el cumplimiento del Convenio de Minamata sobre el Mercurio, el censo de pilas de lixiviación y las observaciones de campo evidenciaron incumplimientos a las disposiciones establecidas en el Artículo 7 y Anexo C para el sector MAPE de oro. [1] En la totalidad de los sitios evaluados, los relaves lixiviados con soluciones cianuradas provienen de procesos de amalgamación de mineral en bruto con Hg, y no de concentrados de oro. Estos relaves son almacenados temporalmente en lagunas de construcción artesanal, sin geomembrana ni sistemas de impermeabilización, lo que representa un potencial riesgo de infiltración al acuífero. En algunos casos, dichas lagunas se utilizan para la recuperación de concentrados de oro producto de la amalgamación, mientras que en otros funcionan únicamente como estructuras de almacenamiento temporal de relaves previo a su reprocesamiento en pilas de lixiviación Fig. 5.



Fig. 5: Laguna de construcción artesanal, ubicada en aldea La Mina.

Adicionalmente, se documentó la quema expuesta de amalgama en zonas residenciales sin el uso sistemático de retortas para la recuperación del Hg volatilizado Fig. 6. Asimismo, en todos los sitios donde operan pilas de lixiviación se observó la lixiviación con cianuro de materiales que no han sido previamente remediados de Hg, práctica que representa riesgos ambientales y de salud ocupacional. En este contexto, el relave inicial producto de la amalgamación no constituye un pasivo ambiental permanente, mientras que el relave final generado tras la lixiviación sí adquiere dicha condición, al ser dispuesto definitivamente en los mismos sitios de operación, donde se acumula en forma de montículos. Esta interacción entre Hg y CN en el suelo y agua incrementa el riesgo asociado a la posible formación de compuestos altamente tóxicos, como el cianuro de mercurio (II), con implicaciones relevantes para la gestión ambiental y sanitaria en la zona de estudio.



Fig. 6: Zona residencial donde se lleva a cabo la quema de amalgama, ubicada en Santa Cruz Minas.

D. CONCLUSIONES

Este estudio establece una línea base integral de la calidad del agua subterránea en una zona mineralizada con presencia de actividades de extracción y beneficiado de oro del sector MAPE en Honduras. La línea base generada permitió la aplicación del Índice de Calidad de Agua (ICA) y constituye un aporte científico relevante para el municipio de Quimistán, dado que, pese a su historia minera que se remonta a los años 1700 según registros anecdóticos de mineros, los estudios previos han estado orientados casi exclusivamente a la prospección y caracterización de recursos minerales para minería industrial, y no a la evaluación del recurso hídrico subterráneo.

La aplicación del ICA en las fuentes de agua subterránea evidenció una condición diferenciada de la calidad del agua, donde un (1) sitio presenta calidad buena, once (11) sitios calidad regular, cuatro (4) sitios calidad marginal y un (1) sitio calidad pobre. Esta distribución refleja la influencia combinada de procesos geogénicos asociados a la mineralización del área y de presiones antrópicas vinculadas al beneficiado de relaves mineros, particularmente en relación con la movilización de elementos como el arsénico (As) y el níquel (Ni), cuyos valores exceden los máximos admisibles en varias fuentes. Desde una perspectiva de gestión ambiental y sanitaria, estos resultados indican que el uso directo de dichas fuentes para consumo humano no es seguro sin procesos previos de potabilización, considerando el riesgo de efectos crónicos en la salud, especialmente la arsenicosis asociada a la exposición prolongada a concentraciones elevadas de arsénico.

Los resultados del estudio evidencian la necesidad de fortalecer la gestión de la calidad del agua subterránea en contextos MAPE mediante un enfoque preventivo e integral. Esto implica priorizar el establecimiento de una red de monitoreo sistemática en fuentes con ICA regular, marginal y pobre, la estandarización de protocolos de muestreo que permitan evaluaciones comparables entre épocas seca y lluviosa, y la adopción de medidas inmediatas de protección sanitaria. En particular, la excedencia de los valores máximos admisibles de arsénico en varias fuentes hace imprescindible la restricción de su uso para consumo humano y la sustitución temporal del abastecimiento, mientras se implementan sistemas adecuados de potabilización. Estas acciones sientan las bases para una gestión sostenible, replicable y basada en evidencia científica del recurso hídrico en municipios con presencia de MAPE.

Por último, si bien es cierto que los valores máximos admisibles de CN y su especiación no exceden lo contemplado en la Norma Técnica para Calidad de Agua Potable de Honduras (0.07 mg/L) [6], la presencia en concentraciones traza pueden ser nocivas para los seres vivos, y debido a la incertidumbre del análisis que por su método solo detecta concentraciones ≥ 0.05 mg/L, no se descarta que exista presencia de CN en los relaves y que a futuro estos puedan llegar a representar un riesgo ambiental para el recurso hídrico

salud ecosistémica, y seguridad e higiene ocupacional de los mineros, y pobladores.

Usualmente, en el sector MAPE la degradación del CN ocurre de manera natural, en condiciones no controladas, donde predominan los factores ambientales de cada región. Sin embargo, y esta degradación por sí sola puede no llegar a reducir los niveles de CN a los permitidos para realizar descargas, ante lo cual aplica las Normas Técnicas de las Descargas de Aguas Residuales a Cuerpos Receptores y Alcantarillado Sanitario (0.50 mg/L) [14], las cuales incluso son concentraciones más permisibles respecto a la de agua potable, y pueden generar afectación en los ecosistemas.

Tomando en consideración lo anterior, la neutralización efectiva del cianuro se puede lograr mediante agentes oxidantes, la cual se ha utilizado ampliamente en el sector minero industrial, y adaptando estos procesos al sector MAPE, se pueden utilizar los reactivos más comunes que se encuentran disponibles como: El peróxido de hidrógeno (H_2O_2), lejía o hipoclorito de sodio ($NaClO$), dióxido de azufre (SO_2), y el sulfato de hierro, que puede presentarse en dos formas dependiendo de su estado de oxidación: sulfato de hierro (II) o ferroso ($FeSO_4$) y sulfato de hierro (III) o férrico ($Fe_2(SO_4)_3$), e incluso se pueden combinar en las pilas estos oxidantes con el caucho, el cual tiene grupos tiol, demostrando que ayudan a clarificar soluciones, y precipitar el Hg que está asociado a sedimentos finos [15].

Respecto a un patrón geoespacial concluyente asociado a la presencia de cianuro, no se logró identificar debido a que las concentraciones de CN-total se mantuvieron por debajo del valor máximo admisible, limitando la identificación de gradientes o tendencias espaciales

RECOMENDACIONES

Se recomienda fortalecer la gestión de la calidad del agua subterránea en las aldeas de Santa Cruz Minas y La Mina mediante la ampliación de la línea base generada en este estudio, a través de la elaboración de un catastro integral de fuentes de agua subterránea basado en un censo hídrico sistemático, que permita priorizar sitios para monitoreo y apoyar la planificación municipal en contextos MAPE.

Asimismo, futuras evaluaciones deberían incorporar parámetros actualmente no analizados, como Hg-total y su especiación, así como indicadores microbiológicos, con el fin de lograr una evaluación más integral de los riesgos ambientales y sanitarios asociados al uso del agua subterránea.

Adicionalmente, se recomienda incluir el análisis de especies iónicas y nutrientes para explicar los elevados valores de conductividad eléctrica observados, así como repetir los muestreos en época seca para reducir el efecto de dilución estacional. Finalmente, resulta clave fortalecer las capacidades técnicas e institucionales del Departamento Municipal

Ambiental (DEMA) de Quimistán, mediante alianzas estratégicas con el Instituto Hondureño de Geología y Minas (INHGEOMIN), Secretaría de Recursos Naturales y Ambiente (SERNA), y el Centro de Estudios y Control de Contaminantes (CESCCO-SERNA) y academia, a fin de consolidar un sistema de monitoreo sostenible, desarrollar soluciones de potabilización adaptadas al contexto local y dar continuidad a la línea base establecida por esta investigación.

Por último, se insta a las instituciones estatales a promover incentivos para la formalización del sector MAPE, así como programas de asistencia técnica. La predominancia de esquemas laborales informales dificulta el control y seguimiento por parte de los entes fiscalizadores y, al no contar con Derechos Mineros ni Licencias Ambientales, limita la implementación de medidas de mitigación ambiental.

AGRADECIMIENTO/RECONOCIMIENTO

A los mineros de la Cooperativa "Los Túneles de las Minas Limitada" (COTUML) y pobladores de Quimistán, por permitirme conocer a detalle sus procesos y realizar esta investigación en sus comunidades.

A la Secretaría de Recursos Naturales y Ambiente (SERNA) y el Instituto Hondureño de Geología y Minas (INHGEOMIN), por el financiamiento para el desarrollo de esta investigación.

REFERENCIAS

[1] Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), *Convenio de Minamata sobre el Mercurio: Texto y anexos*. Sept. 2019. [En línea]. Disponible en: <https://minamataconvention.org/sites/default/files/2021-06/Minamata-Convention-booklet-Sep2019-SP.pdf>

[2] S. J. Spiegel, S. Agrawal, D. Mikha, K. Vitamerry, P. Le Billon, M. Veiga, K. Konolius and B. Paul, "Phasing Out Mercury? Ecological Economics and Indonesia's Small-Scale Gold Mining Sector," *Ecological Economics*, vol. 144, pp. 1–11, 2018, doi: 10.1016/j.ecolecon.2017.07.025

[3] Palacios Ordenes, R. A. (2024). Calidad del Agua y Contaminación por mercurio en la microcuenca Río Calderas: Aportes de la MAPE de oro, en *El Corpus-Choluteca*. Tegucigalpa, Honduras.

[4]. Diop, M, et al. (2023). Development and Application of Water Quality Index (WQI) for the Evaluation of the Physico-Chemical Quality of Groundwater in Gold Mining Areas of Southeastern Senegal. *Journal of Water Resource and Protection*, 33-50.

[5] Canadian Council of Ministers of the Environment. (2017). CCME Water Quality Index User's Manual.

[6] República de Honduras Ministerio de Salud. (1995). *Norma Técnica para la calidad del Agua Potable*.

[7] Parlamento Europeo & Consejo de la Unión Europea. (2020). Directiva (UE) 2020/2184 del Parlamento

Europeo y del Consejo de 16 de diciembre de 2020 relativa a la calidad de las aguas destinadas al consumo humano. Obtenido de <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32020L2184>.

[8] Organización Mundial de la Salud. (2011). Guías para la Calidad del Agua de Consumo Humano Ginebra, Suiza.

[9] Yunus, M., Sohel, N., Hore, S. K., & Rahman, M. (2011). Arsenic exposure and adverse health effects: a review of recent findings from arsenic and health studies in Matlab, Bangladesh. *Kaohsiung J Med Sci*, 371-376.

[10] Adeleju, S. B., Khan, S., & Patti, A. F. (2021). Arsenic Contamination of Groundwater and Its Implications for Drinking Water Quality and Human Health in Under-Developed Countries and Remote Communities—A Review. *Applied Sciences*, 1-24.

[11] Smedley & Kinniburgh, 2002, citado por Moore, K, 2005. (2005). Treatment of Arsenic Contaminated Groundwater using Oxidation and Membrane Filtration . Waterloo, Ontario, Canada.

[12]World Health Organization . (2021). Nickel in drinking-water Background document for development of WHO Guidelines for drinking-water quality.

[13] Hammer, Vincent. et al. (2024). Characterization of medium and small-scale gold processing operations, wastewaters, and tailings in the Arequipa region of Peru. *Science of the Total Environment*, 1-10.

[14] Secretaría de Salud de Honduras. (1996). Normas Técnicas de las Descargas de Aguas Residuales a Cuerpos Receptores y Alcantarillado Sanitario. Tegucigalpa, M.D.C.

[15] Stapper, D., Dales, K., & Keane, S. (2021). Mejores prácticas de manejo en el uso del cianuro en la minería aurífera artesanal y de pequeña escala. Publicado por el Programa planetGOLD (Fondo para el Medio Ambiente Mundial y Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente).