



The Biologist (Lima)



ORIGINAL ARTICLE / ARTÍCULO ORIGINAL

ENVIRONMENTAL EPIDEMIOLOGICAL RISK OF ARSENIC IN THE MOQUEGUA REGION, PERU

RIESGO EPIDEMIOLÓGICO AMBIENTAL DEL ARSÉNICO EN LA REGIÓN DE MOQUEGUA, PERÚ

Manuel Aníbal Rodríguez-Salas¹, René Germán Sosa-Vilca¹ & George Argota-Pérez²

¹ Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental. Facultad de Ingeniería y Arquitectura. Universidad Nacional de Moquegua. Moquegua, Perú. marsarica@gmail.com; rsosav@unam.edu.pe

² Centro de Investigaciones Avanzadas y Formación Superior en Educación, Salud y Medio Ambiente "AMTAWI". Ica, Perú. george.argota@gmail.com

* Corresponding Author: rsosav@unam.edu.pe

Manuel Aníbal Rodríguez-Salas: <https://orcid.org/0000-0003-1748-7997>

René Germán Sosa-Vilca: <https://orcid.org/0000-0003-2248-3464>

George Argota-Pérez: <https://orcid.org/0000-0003-2560-6749>

ABSTRACT

The study analyzed the environmental epidemiological risk of arsenic in the Moquegua region, Peru, between January and August 2025. A descriptive study design was applied, and a total of 50 environmental samples were collected, including water, soil, bovine milk, and cattle hair, from the watersheds of the Coralaque River (General Sánchez Cerro province) and the Tambo River (Mariscal Nieto province). Arsenic concentrations were determined by hydride generation atomic absorption spectrometry (HGAAS). The results showed mean concentrations of 0.123 ± 0.015 mg/L in the Coralaque River and 0.095 ± 0.012 mg/L in the Tambo River, exceeding the regulatory limit (0.010 mg/L) by 9.5 to 12.3 times. In agricultural soil from the Torata Valley, arsenic levels of 22.8 ± 3.7 mg/kg were detected, while bovine milk and cattle hair presented 0.0916 ± 0.046 mg/kg and 0.9616 ± 0.53 mg/kg, respectively. These values confirmed the bioaccumulation of the metalloid and its trophic transfer. It was concluded that arsenic contamination in Moquegua constitutes a structural environmental epidemiological risk, highlighting the need to adjust Peruvian regulations and strengthen intersectoral health surveillance.

Keywords: arsenic – bioaccumulation – environmental contamination – environmental epidemiology – Moquegua

Este artículo es publicado por la revista *The Biologist (Lima)* de la Facultad de Ciencias Naturales y Matemática, Universidad Nacional Federico Villarreal, Lima, Perú. Este es un artículo de acceso abierto, distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0) [<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.es>] que permite el uso, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada de su fuente original.

DOI: <https://doi.org/10.62430/rtb20252322026>



RESUMEN

El estudio analizó el riesgo epidemiológico ambiental del arsénico en la región de Moquegua, Perú, entre enero y agosto de 2025. Se aplicó un diseño descriptivo, recolectándose un total de 50 muestras ambientales, incluyendo agua, suelo, leche bovina y pelo de ganado, provenientes de las cuencas de los ríos Coralaque (provincia de General Sánchez Cerro) y Tambo (provincia de Mariscal Nieto). Las concentraciones de arsénico se determinaron mediante espectrometría de absorción atómica con generación de hidruros (HGAAS). Los resultados mostraron concentraciones promedio de $0,123 \pm 0,015$ mg/L en el río Coralaque y $0,095 \pm 0,012$ mg/L en el río Tambo, superando entre 9,5 y 12,3 veces el límite de la norma utilizada ($0,010$ mg/L). En suelo agrícola del valle de Torata se detectó $22,8 \pm 3,7$ mg/kg, mientras que en leche bovina y pelo de ganado se registraron $0,0916 \pm 0,046$ mg/kg y $0,9616 \pm 0,53$ mg/kg, respectivamente. Estos valores confirmaron la bioacumulación del metaloide y su transferencia trófica. Se concluyó que, la contaminación por arsénico en Moquegua constituye un riesgo epidemiológico ambiental estructural, reforzando la necesidad de ajustar la normativa peruana y fortalecer la vigilancia sanitaria intersectorial.

Palabras clave: arsénico – bioacumulación – contaminación ambiental – epidemiología ambiental – Moquegua

INTRODUCCIÓN

El estudio del riesgo epidemiológico ambiental se ha consolidado como un campo transdisciplinar que articula la toxicología ambiental, la salud pública y la gestión del territorio (Cannon, 2020; Deglin *et al.*, 2021). En este marco, la contaminación por metales y metaloides constituye una de las problemáticas más persistentes y complejas del siglo XXI, por su vínculo con los modelos extractivos, la inequidad socioambiental y las deficiencias en gobernanza sanitaria. Entre estos contaminantes, el arsénico (As) ocupa un lugar central debido a su ubicuidad geológica, su persistencia química y su reconocida capacidad carcinogénica (Chen & Costa, 2021; Philip & Chhabra, 2022).

En el contexto latinoamericano, la exposición crónica al arsénico ha sido ampliamente documentada en diversos países durante los últimos años, consolidando un patrón regional de riesgo ambiental y sanitario. En Argentina, investigaciones hidrogeoquímicas recientes confirmaron concentraciones elevadas de As en acuíferos de la provincia de La Pampa, con valores que superaron los 50 µg/L, asociados principalmente a fuentes geogénicas del sistema Chaco-Pampeano (Aullón *et al.*, 2020). En Chile, la persistencia del As en las regiones de Antofagasta y Atacama continúa representando un riesgo para la salud pública; investigaciones sobre gobernanza ambiental han evidenciado que, pese a las mejoras regulatorias, subsisten fuentes naturales y antropogénicas de exposición (Ibarra *et al.*, 2018). En México, recientes análisis geoquímicos identificaron tendencias ascendentes de As en aguas subterráneas del centro del país, vinculadas tanto a la

composición litológica como a la sobreexplotación de acuíferos, alcanzando concentraciones de hasta 180 µg/L (Morales *et al.*, 2023). Finalmente, en Perú, estudios efectuados en la región minera de Moquegua reportaron acumulación de metales potencialmente tóxicos y metaloides, incluido As, en suelos agrícolas y cultivos alimentarios, confirmando un proceso de exposición ambiental con potencial efecto epidemiológico (Bedoya *et al.*, 2023a).

En conjunto, estos hallazgos recientes refuerzan que la problemática del As en América Latina constituye un fenómeno estructural, derivado tanto de condiciones hidrogeológicas naturales como de la expansión de actividades extractivas, lo que demanda enfoques epidemiológicos y regulatorios integrados. Estas situaciones plantean desafíos que exceden el ámbito local y demandan una lectura epidemiológica integrada, capaz de relacionar las dinámicas ambientales con los efectos en la salud humana y la sostenibilidad de los ecosistemas (Monteiro De Oliveira *et al.*, 2021).

En el Perú, la convergencia entre intensa actividad minera, deficiente fiscalización ambiental y debilidad institucional ha favorecido la acumulación histórica de metales pesados en distintas regiones (Ramos *et al.*, 2022). Moquegua, situada en la zona sur andina del Perú, constituye un caso paradigmático donde la intensa actividad minera coexiste con ecosistemas frágiles y comunidades expuestas a fuentes geotérmicas y relaves mineros, evidenciándose concentraciones de arsénico que superan los estándares internacionales de calidad ambiental (Bedoya *et al.*, 2023b).

El riesgo epidemiológico se manifiesta en la contaminación de los cuerpos de agua, suelos y alimentos, así como en la detección del metaloide en fluidos biológicos humanos (Das Sarkar *et al.*, 2022).

Se evidencia un vacío en los estudios integradores que vinculen la evidencia ambiental con indicadores epidemiológicos y marcos normativos. Aunque existen registros fragmentarios de monitoreo ambiental y tamizaje poblacional, pocos trabajos han explorado el carácter estructural del problema, su evolución temporal y sus implicaciones en salud pública. Esta insuficiencia justifica la necesidad de un enfoque analítico que combine evidencia técnica, epidemiológica y regulatoria (Stewart & Wilkinson, 2020; Brander, 2022; López *et al.*, 2024).

El problema central radica en la persistencia del As en el ambiente y su incorporación en la cadena alimentaria, configurando un escenario de exposición crónica en comunidades vulnerables. Esta situación revela contradicciones entre la normativa nacional que admite niveles hasta quince veces superiores a los recomendados por la OMS y los principios de protección sanitaria. Sus consecuencias se expresan en la creciente prevalencia de metales en sangre y orina, afectando de manera desproporcionada a niños y mujeres gestantes (Rahaman *et al.*, 2022, Patel *et al.*, 2023; Zhao *et al.*, 2024).

Desde una perspectiva epistemológica, la investigación se enmarca en la ecología de la salud y la epidemiología ambiental crítica, que reconocen la interdependencia entre sistemas ecológicos y sociales (Parkes *et al.*, 2020). Su coherencia metodológica se fundamenta en la articulación de datos empíricos y análisis comparativo, garantizando consistencia interna y validez académica en el ámbito de la comunicación científica internacional (Lorenzini *et al.*, 2024).

El objetivo del estudio fue analizar el riesgo epidemiológico ambiental del arsénico en la región de Moquegua, Perú.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio fue de tipo descriptivo y analítico, orientado a evaluar la magnitud, distribución y consecuencias del riesgo epidemiológico ambiental derivado de la exposición al As en la región de Moquegua, Perú.

Se desarrolló entre enero y agosto de 2025, abarcando las provincias de General Sánchez Cerro y Mariscal Nieto, territorios caracterizados por alta actividad minera y

antecedentes documentados de contaminación por metales pesados. La investigación se centró en la evaluación de matrices ambientales representativas como el agua, suelo y productos pecuarios y en el análisis secundario de información epidemiológica institucional, con el propósito de identificar zonas críticas de exposición y estimar el potencial riesgo sanitario para la población.

Las muestras ambientales se recolectaron en puntos estratégicos a lo largo de las cuencas de los ríos Coralaque (provincia General Sánchez Cerro) y Tambo (provincia Mariscal Nieto), seleccionados según criterios de representatividad hidrogeológica, accesibilidad y grado de intervención antrópica. El río Coralaque ($-16,89^\circ$, $-70,92^\circ$; 4 250 msnm) corresponde a un curso altoandino de origen geotérmico con influencia minera. El río Tambo ($-17,09^\circ$, $-71,09^\circ$; 2 800 msnm) constituye la principal fuente hídrica regional de uso agrícola y recibe aportes desde los ríos Carumas y Torata. La selección de los sitios consideró gradientes altitudinales alto, medio y bajo para representar variaciones naturales y antrópicas en la distribución del As.

En total se recolectaron 50 muestras ambientales, distribuidas en 20 de agua superficial (General Sánchez Cerro = 10, Mariscal Nieto = 10). Debido a que la disponibilidad agropecuaria real, existe en la provincia Mariscal Nieto, donde se concentra la mayor actividad agrícola y ganadera de la región de Moquegua (particularmente en los valles de Torata, Tumilaca y Samegua), entonces esta área resulta más representativa para evaluar matrices agropecuarias como el suelo, leche y pelo. Por tanto, se consideró 15 muestras de suelo agrícola, 10 muestras de leche bovina y cinco muestras de pelo de ganado, representando los componentes más relevantes de la interacción entre ambiente, producción agropecuaria y salud pública. La frecuencia de muestreo fue bimensual entre enero y agosto de 2025, permitiendo captar la variabilidad estacional asociada a periodos de estiaje y lluvias.

En el caso del agua superficial, se establecieron tres puntos por cuenca, analizándose como una sola muestra de tipo compuesta. Las muestras de suelo agrícola se obtuvieron en áreas de cultivo de hortalizas y forraje, a una profundidad promedio de 0–20 cm, siguiendo el protocolo ISO 11466 (ISO, 1995). Las muestras de leche bovina y pelo de ganado fueron tomadas directamente de hatos representativos del valle de Moquegua, en coordinación con los productores locales, priorizando animales con más de seis meses de residencia en la zona. Esta distribución muestral permitió integrar la exposición ambiental con posibles vías de transferencia trófica del arsénico hacia los productos de consumo humano.

Las muestras de agua se recolectaron siguiendo el protocolo EPA Method 200.8 (USEPA, 1994) para la determinación de arsénico total mediante espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS), mientras que las muestras de suelo se procesaron conforme a la norma ISO 11466:1995 (ISO, 1995) para la extracción total de elementos traza en suelos y sedimentos.

Las matrices biológicas animales leche y pelo de ganado se analizaron mediante espectrometría de absorción atómica con generación de hidruros (HGAAS), técnica que garantiza alta sensibilidad en la cuantificación de As inorgánico. Los resultados fueron expresados en mg/L para agua y en mg/kg para las demás matrices, asegurando la comparabilidad de las concentraciones detectadas con los valores de referencia internacionales.

La información epidemiológica complementaria provino de los registros oficiales de la Dirección Regional de Salud de Moquegua (DIRESA, 2023) y del Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA, 2024), los cuales proporcionaron datos de tamizajes biológicos en población humana y reportes de calidad ambiental asociados a zonas de riesgo.

El tratamiento estadístico se realizó mediante el programa SPSS v.25, aplicando estadística descriptiva con medidas de tendencia central y dispersión, expresadas en promedios, desviaciones estándar y porcentajes. La interpretación de los resultados se sustentó en los valores regulatorios establecidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS, Guía para la Calidad del Agua Potable, cuarta edición con adendas de 2022), la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA, 2019) para suelos agrícolas, la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA, 2022) para productos lácteos, y la Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (ATSDR, 2020) para biomarcadores de exposición animal, complementados con los Estándares de Calidad Ambiental del Perú establecidos por el Decreto Supremo N.º 015-2015-MINAM (DS, 2015), que define los valores guía nacionales para agua y suelo.

Aspectos éticos: El estudio se ajustó a los principios de integridad científica y respeto ambiental, garantizando el uso exclusivo de información pública y muestras no humanas. La recolección de leche y pelo de ganado se efectuó con la autorización expresa de los propietarios de los animales, previa explicación del propósito y alcance del estudio, asegurando el cumplimiento de las normas de bienestar animal y bioseguridad establecidas por el Servicio Nacional de Sanidad Agraria. Todas las muestras fueron obtenidas sin causar daño ni alterar las condiciones

fisiológicas de los animales, conforme a la Guía técnica para la toma de muestras biológicas en animales domésticos y productos pecuarios (SENASA, 2023). Asimismo, se garantizó la trazabilidad analítica, la confidencialidad de los datos y una interpretación responsable orientada a la protección sanitaria y la gestión ambiental sostenible en la región de Moquegua.

RESULTADOS

La Tabla 1 muestra las concentraciones promedio de arsénico (As) determinadas en 20 muestras de agua superficial recolectadas de manera bimensual entre enero y agosto de 2025 en los ríos Coralaque (provincia General Sánchez Cerro) y Tambo (provincia Mariscal Nieto). Los valores se interpretaron conforme a los límites guía establecidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS / WHO, 2022) y los Estándares de Calidad Ambiental del Perú definidos por el Decreto Supremo N.º 015-2015-MINAM. Las concentraciones registradas en ambos ríos fueron superiores al valor internacional recomendado de 0,010 mg/L, aunque se mantuvieron dentro del rango permitido por la normativa nacional (0,150 mg/L), evidenciando un riesgo epidemiológico ambiental en condiciones de exposición prolongada.

En el río Coralaque, la concentración promedio registrada fue de $0,123 \pm 0,015$ mg/L, lo que representa un nivel 12,3 veces mayor al recomendado por la OMS. En el río Tambo, se obtuvo una concentración promedio de $0,095 \pm 0,012$ mg/L, equivalente a 9,5 veces el valor internacional de referencia.

Estos resultados indican una contaminación ambiental significativa con riesgo epidemiológico, debido a que, si bien los valores cumplen con el estándar nacional vigente, la exposición prolongada a concentraciones por encima del umbral internacional implica un potencial daño crónico en la salud de las poblaciones ribereñas, particularmente en comunidades que utilizan estas aguas para el consumo humano, el riego agrícola y la ganadería. La discrepancia entre los límites nacionales y las recomendaciones internacionales pone de manifiesto una brecha normativa crítica que permite condiciones de contaminación “legalmente aceptadas”, pero epidemiológicamente peligrosas para la salud pública y la sostenibilidad ambiental en Moquegua.

Tabla 1. Concentración promedio del arsénico (As) en aguas superficiales de la región de Moquegua, Perú. n = 10, Periodo de muestreo = bimensual (ene–ago 2025).

Tipo de muestra	Localidad	Concentración promedio (mg/L)	n	Límite OMS (2022)	Límite DS 015-2015-MI-NAM
Agua superficial – Río Coralaque	General Sánchez Cerro	0,123 ± 0,015	10	0,010	0,150
Agua superficial – Río Tambo	Mariscal Nieto	0,095 ± 0,012	10		

La Tabla 2 presenta las concentraciones promedio de arsénico As en suelo agrícola, leche bovina y pelo de ganado, como promedio de los muestreos bimensuales. Los resultados evidencian una transferencia trófica del As desde el ambiente hacia la cadena alimentaria, lo que confirma un proceso de bioacumulación de relevancia epidemiológica (Ali *et al.*, 2019).

En el suelo agrícola, la concentración promedio fue de $22,8 \pm 3,7$ mg/kg, ligeramente superior al valor de referencia internacional establecido por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA, 2019), que fija un máximo de 20 mg/kg para suelos de uso agrícola. Este resultado sugiere la existencia de una contaminación difusa, probablemente asociada a la irrigación con aguas superficiales afectadas por descargas mineras.

En el caso de la leche bovina, la concentración registrada alcanzó $0,0916 \pm 0,046$ mg/kg, valor que duplica el límite máximo permisible propuesto por la Autoridad Europea

de Seguridad Alimentaria (EFSA, 2022), que es de 0,05 mg/kg. Este hallazgo demuestra la bioacumulación del As en productos de consumo humano, lo que incrementa el riesgo de exposición indirecta en la población.

Por su parte, el pelo de ganado presentó un contenido promedio de $0,96 \pm 0,53$ mg/kg, superando el valor de referencia toxicológica de $< 0,5$ mg/kg establecido por la Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (ATSDR, 2020). Este resultado constituye un indicador biológico de exposición crónica, ya que el pelo refleja la acumulación prolongada del metaloide en el organismo animal.

En conjunto, estos valores confirman que la contaminación por As no se limita al agua superficial, sino que se extiende a los sistemas agropecuarios, representando un riesgo epidemiológico ambiental con potencial de afectación tanto local como regional.

Tabla 2. Concentración de arsénico (As) en matrices ambientales complementarias de la región de Moquegua, Perú.

Tipo de muestra	n	Concentración promedio	Valor de referencia internacional	Fuente
Suelo agrícola	15	$22,8 \pm 3,7$ mg/kg	≤ 20 mg/kg	USEPA (2019)
Leche bovina	10	$0,0916 \pm 0,046$ mg/kg	$\leq 0,05$ mg/kg	EFSA (2022)
Pelo de ganado	5	$0,9616 \pm 0,53$ mg/kg	$< 0,5$ mg/kg	ATSDR (2020)

DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos reflejaron un patrón de contaminación ambiental sostenida y multivectorial en la región de Moquegua. Las concentraciones promedio de As en los ríos Coralaque y Tambo fueron significativamente superiores al límite guía internacional de 0,010 mg/L establecido por la Organización Mundial de la Salud, pero permanecieron dentro del valor permisible del Decreto Supremo N.º 015-2015-MINAM. Este hallazgo evidenció una disonancia entre los parámetros

normativos y los umbrales epidemiológicos de riesgo. La consistencia metodológica del estudio basada en protocolos analíticos validados (EPA 200.8 e ISO 11466), sustentó la confiabilidad de los datos, demostrando coherencia entre el objetivo y las técnicas empleadas. Tales niveles de As sugirieron un proceso de exposición crónica en las comunidades ribereñas, donde la fuente principal de contaminación estuvo asociada tanto a pasivos mineros como a procesos geotérmicos naturales, configurando un riesgo epidemiológico ambiental de naturaleza acumulativa (Cannon, 2020).

La interpretación de estos resultados reveló que, aun cuando la calidad del agua cumplía con la normativa peruana, la exposición prolongada a concentraciones que superaron los valores guía internacionales representaba un potencial daño sistémico a largo plazo. Este fenómeno reflejó lo que Brander (2022) denominó “paradoja normativa”, en la que los estándares legales se vuelven permisivos frente a los criterios de protección sanitaria. En ese sentido, la situación de Moquegua podría considerarse un caso paradigmático de contaminación crónica institucionalmente tolerada, donde los vacíos regulatorios impidieron una respuesta preventiva eficaz.

En términos comparativos, los valores de As hallados en agua mostraron coincidencia con estudios previos realizados en regiones del norte de Chile y en la Puna argentina, donde las concentraciones promedio oscilaron entre 0,08 y 0,14 mg/L (Das Sarkar *et al.*, 2022), niveles similares a los observados en los ríos Coralaque y Tambo. Sin embargo, la particularidad del contexto moqueguano radicó en la coexistencia de fuentes geológicas naturales y actividades mineras en operación o post-cierre, lo que amplificó la complejidad del escenario ambiental. En contraste, investigaciones realizadas en México y Bangladesh mostraron que las comunidades con exposición prolongada a niveles comparables desarrollaron tasas elevadas de cáncer de piel, vejiga y pulmón (Rahaman *et al.*, 2022), lo que permite inferir que las poblaciones moqueguanas enfrentan un riesgo sanitario semejante si no se adoptan medidas de mitigación urgentes.

El análisis de las matrices ambientales complementarias ofreció evidencia adicional de un proceso de bioacumulación y transferencia trófica del As. Los valores detectados en suelo agrícola del valle de Torata ($22,8 \pm 3,7$ mg/kg) superaron el límite de 20 mg/kg fijado por la USEPA (2019), indicando una contaminación difusa compatible con irrigación mediante aguas contaminadas. Este resultado corroboró la hipótesis de una ruta indirecta de exposición humana a través de los sistemas agroalimentarios. Desde una perspectiva interpretativa, esta contaminación del suelo puede considerarse un eslabón clave en la dinámica del riesgo, ya que actúa como reservorio y vector de transferencia hacia cultivos y productos pecuarios.

En el caso de la leche bovina, la concentración de As promedio de $0,0916 \pm 0,046$ mg/kg duplicó el valor de referencia de la EFSA (2022), lo cual coincidió con observaciones realizadas por Monteiro De Oliveira *et al.* (2021) en zonas rurales de Brasil, donde se constató una correlación directa entre la calidad del agua de riego y los niveles de As en leche y forraje. Este paralelismo reforzó la validez de la interpretación local y subrayó la urgencia de implementar controles de

calidad alimentaria en la región. De igual modo, el pelo de ganado, con una concentración de As promedio de $0,9616 \pm 0,53$ mg/kg, superó casi el doble del valor toxicológico de referencia de la ATSDR (2020), lo que representó un indicador biológico robusto de exposición crónica. Estos hallazgos fueron congruentes con los reportes de Chen & Costa (2021), quienes destacaron que los biomarcadores animales son excelentes predictores del riesgo poblacional en contextos de exposición ambiental prolongada.

Críticamente, la convergencia de altos niveles de As en agua, suelo y productos pecuarios demostró que el riesgo en Moquegua trasciende la esfera ambiental y se proyecta hacia la seguridad alimentaria y la salud pública. El patrón de contaminación revelado sugiere un ciclo de retroalimentación entre la degradación ambiental y la vulnerabilidad epidemiológica, en el que los mecanismos de vigilancia institucional resultaron insuficientes o fragmentados. La falta de alineamiento entre los valores nacionales y las recomendaciones internacionales generó una brecha de gobernanza ambiental que, como señaló Stewart & Wilkinson (2020), debilita la capacidad de los Estados para responder ante emergencias toxicológicas de carácter estructural.

Los resultados de este estudio se insertaron en una tendencia global que reconoce el As como uno de los contaminantes más persistentes y de mayor impacto sanitario del siglo XXI. La evidencia internacional indica que las regiones con modelos extractivos intensivos, como las del sur andino, tienden a mostrar correlaciones entre exposición ambiental y prevalencia de patologías crónicas (Philip & Chhabra, 2022). La coincidencia de los valores observados en Moquegua con los reportes de Argentina, Chile y México sugiere un patrón regional que combina vulnerabilidad geológica, deficiencia regulatoria y exposición social acumulativa. Sin embargo, el presente estudio aportó una visión integrada del riesgo epidemiológico ambiental al vincular cuantitativamente la contaminación de matrices ambientales con la evidencia biológica y normativa, superando los enfoques fragmentarios que han predominado en estudios previos.

En términos de aportes teóricos, el estudio contribuyó a la consolidación de la epidemiología ambiental crítica como marco interpretativo de la exposición al arsénico, demostrando que el riesgo no es solo un fenómeno químico medible, sino también un reflejo de la estructura institucional y política que lo gestiona. Este enfoque permite comprender que la persistencia del As en Moquegua no deriva únicamente de procesos naturales o industriales, sino de la interacción entre un entorno regulatorio laxo y una respuesta sanitaria insuficiente. De este modo, la

investigación aporta evidencia para fortalecer los sistemas de vigilancia ambiental y epidemiológica, y plantea la necesidad de armonizar los estándares peruanos con los marcos internacionales de protección de la salud.

Los hallazgos confirmaron la existencia de un escenario de riesgo epidemiológico ambiental estructural en Moquegua, sustentado en la bioacumulación del As en diferentes matrices y en la brecha entre la legalidad nacional y la seguridad sanitaria global. La coherencia metodológica, el uso de técnicas analíticas estandarizadas y la consistencia de los resultados con estudios previos otorgan solidez científica al análisis. Desde una perspectiva disciplinaria, este estudio resultó pertinente y relevante para la salud ambiental y la toxicología aplicada, al proporcionar una base empírica y crítica para la formulación de políticas de control del As y la protección integral de las poblaciones expuestas.

Aunque el estudio logró integrar evidencia ambiental y epidemiológica con coherencia metodológica, su principal limitación radicó en el alcance temporal y espacial de las mediciones, dado que las concentraciones de As se evaluaron durante un único periodo de muestreo entre enero y agosto de 2025. Esta delimitación impidió observar posibles variaciones estacionales que podrían influir en la dinámica hidrogeoquímica del arsénico, especialmente en zonas con fluctuaciones de caudal o actividad minera variable. Asimismo, el análisis se basó en muestras ambientales representativas, sin incorporar biomonitorio humano directo, lo que restringe la cuantificación precisa del riesgo individual. No obstante, estas limitaciones no comprometen la validez ni la robustez de los hallazgos, ya que el diseño descriptivo y la triangulación de fuentes garantizaron la consistencia de las conclusiones sobre la magnitud y el carácter estructural del riesgo epidemiológico ambiental en Moquegua.

El estudio permitió indicar que la región de Moquegua enfrenta un riesgo epidemiológico ambiental sostenido y multicausal asociado a la presencia persistente de As en agua, suelo y productos pecuarios, lo que evidencia un proceso activo de bioacumulación con potencial impacto en la salud humana y la seguridad alimentaria. Las concentraciones detectadas en los ríos Coralaque y Tambo de Moquegua, superaron ampliamente los valores guía internacionales, mientras que los niveles hallados en suelos y productos agropecuarios confirmaron la transferencia trófica del contaminante. Esta situación, aun cuando se encuentra dentro de los límites legales nacionales, resulta epidemiológicamente peligrosa, al reflejar una brecha normativa que permite condiciones de exposición crónica bajo apariencia de cumplimiento regulatorio.

Los resultados validaron la coherencia entre los procedimientos analíticos, los supuestos del estudio y la evidencia empírica obtenida, consolidando un enfoque integral de la epidemiología ambiental aplicada a contextos mineros. En términos prácticos, la investigación aporta fundamentos sólidos para revisar los estándares peruanos de calidad ambiental, fortalecer la vigilancia epidemiológica en zonas mineras activas y promover estrategias intersectoriales de prevención y mitigación del riesgo. En consecuencia, el caso de Moquegua se configura como un referente nacional para comprender y gestionar los efectos sinérgicos entre contaminación ambiental, exposición humana y gobernanza sanitaria, contribuyendo de manera significativa al campo de la salud ambiental y la toxicología del arsénico en América Latina.

Author contribution: CRediT (Contributor Roles Taxonomy)

MARS = Manuel Aníbal Rodríguez-Salas

RGSV = René Germán Sosa-Vilca

GAP = George Argota-Pérez

Conceptualization: MARS

Data curation: MARS

Formal Analysis: MARS

Funding acquisition: MARS

Investigation: MARS

Methodology: MARS, RGSV

Project administration: MARS

Resources: MARS

Software: MARS, RGSV

Supervision: MARS, RGSV

Validation: MARS, RGSV

Visualization: MARS, RGSV

Writing – original draft: MARS, RGSV, GAP

Writing – review & editing: GAP

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). (2020). *Toxicological profile for arsenic*. U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service. Disponible en: <https://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp2.pdf>

- Ali, H., Khan, E., & Ilahi, I. (2019). Environmental chemistry and ecotoxicology of hazardous heavy metals: Environmental persistence, toxicity, and bioaccumulation. *Journal of Chemistry*, 2019, 1–14.
- Aullón, A.A., Schulz, C., Bundschuh, J., Jacks, G., Thunvik, R., Gustafsson, J.P., & Magnus, M.C. (2020). Hydrogeochemical controls on the mobility of arsenic, fluoride and other geogenic co-contaminants in the shallow aquifers of northeastern La Pampa Province in Argentina. *Science of The Total Environment*, 715, 136671.
- Bedoya, P.N.S., Neimaier, A., Maus, D., Escobedo, P.E., Eduardo, K., & Pumi, G. (2023a). Patterns of accumulation and baseline values for metals in agricultural soils from a copper mining region in southern Peru. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 20, 100896.
- Bedoya, P.N.S., Escobedo, P.E., Maus, D., & Pumi, G. (2023b). Dataset of metals and metalloids in food crops and soils from a copper mining region in southern Peru. *Scientific Data*, 10, 523.
- Brander, S.M. (2022). Rethinking our chemical legacy and reclaiming our planet. *One Earth*, 5, 316–319.
- Cannon, C. (2020). Towards convergence: How to do transdisciplinary environmental health disparities Research. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17, 2303.
- Chen, Q.Y., & Costa, M. (2021). Arsenic: A global environmental challenge. *Annual Review of Pharmacology and Toxicology*, 61, 47–63.
- Das Sarkar, S., Swain, P.R., Manna, S.K., Samanta, S., Majhi, P.K., Bera, A.K., Das, B. K., & Mohanty, B. (2022). Arsenic contamination in food chain - a menace to food safety, human nutrition and health. *Journal of Environmental Biology*, 43, 339–349.
- Decreto Supremo: DS (2015). Aprueban los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua y Suelo “N.º 015-2015-MINAM”. Diario Oficial El Peruano, Lima, Perú. https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2015/12/Decreto-Supremo-N%C2%B0-015-2015-MINAM.pdf?utm_source=chatgpt.com
- Deglin, S.E., Chen, C.L., Miller, D.J., Lewis, R.J., Chang, E.T., Hamade, A.K., & Erickson, H.S. (2021). Environmental epidemiology and risk assessment: Exploring a path to increased confidence in public health decision-making. *Global Epidemiology*, 3, 100048.
- Dirección Regional de Salud de Moquegua: DIRESA. (2023). *Informe anual de vigilancia epidemiológica y control de exposición a metales pesados y metaloides en la región Moquegua, 2022–2023*. Ministerio de Salud del Perú. <https://www.dge.gob.pe/portal/docs/vigilancia/sala/2025/SE35/metales.pdf>
- European Food Safety Authority: EFSA. (2022). Scientific opinion on the risks for public health related to inorganic arsenic in food. *EFSA Journal*, 20, e07045.
- Ibarra, C., O’Ryan, R., & Silva, B. (2018). Applying knowledge governance to understand the role of science in environmental regulation: The case of arsenic in Chile. *Environmental Science & Policy*, 86, 115–124.
- International Organization for Standardization- ISO. (1995). ISO 11466:1995. Soil quality — Extraction of trace elements soluble in aqua regia. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization.
- López, M.B.B., Mora, V.G.G., & Gaspar, F.J.M. (2024). Vigilancia epidemiológica de riesgos ambientales en salud. *MQRInvestigar*, 8, 4077–4088.
- Lorenzini, E., Osorio, Galeano, S.P., Schmidt, C.R., Cañon, M.W. (2024). Practical guide to achieve rigor and data integration in mixed methods research. *Investigación y Educación en Enfermería*, 42, e02.
- Ministerio del Ambiente: MINAM. (2015). *Decreto Supremo N.º 015-2015-MINAM: Aprueban los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para agua y establecen disposiciones complementarias*. Diario Oficial El Peruano <https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2015/12/Decreto-Supremo-N%C2%B0-015-2015-MINAM.pdf>
- Monteiro De Oliveira, E.C., Caixeta, E.S., Vieira Santos, V.S., & Barbosa, P.B. (2021). Arsenic exposure from groundwater: environmental contamination, human health effects, and sustainable solutions. *Journal of Toxicology and Environmental Health-Part B-Critical Reviews*, 24, 119–135.
- Morales, deA.H., Gutiérrez, M., Colmenero, C.C.P., Júnez, F.H.E., & Esteller, A.M.V. (2023). Upward trends and lithological and climatic controls of groundwater arsenic, fluoride, and nitrate in central Mexico. *Minerals*, 13, 1145.
- Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental: OEFA. (2024). *Reporte técnico de calidad ambiental en zonas de influencia minera de la región Moquegua*. Ministerio del Ambiente. <https://repositorio.>

- oefa.gob.pe/items/08971adc-6a62-41e8-a466-10b92ab1c801
- Organización Mundial de la Salud (OMS / WHO). (2022). *Guidelines for drinking-water quality: Fourth edition incorporating the first and second addenda*. World Health Organization. <https://iris.who.int/server/api/core/bitstreams/69c17edd-ee26-425b-9d34-33799377e886/content>
- Parkes, M.W., Poland, B., Allison, S., Cole, D.C., Culbert, I., Gislason, M.K., Hancock, T., Howard, C., Papadopoulos, A., & Waheed, F. (2020). Preparing for the future of public health: ecological determinants of health and the call for an eco-social approach to public health education. *Canadian Journal of Public Health*, 111, 60–64.
- Patel, K.S., Pandey, P., Martín, R.P., Corns, W.T., Varol, S., Bhattacharya, S., & Zhu, Y. (2023). A review on arsenic in the environment: contamination, mobility, sources, and exposure. *RSC Advances*, 13, 8803–8821.
- Philip, C.A., & Chhabra, V. (2022). Arsenic contamination: sources, extent and impact on the environment. *Pollution Research*, 41, 312–322.
- Rahaman, S., Mise, N., & Ichihara, S. (2022). Arsenic contamination in food chain in Bangladesh: A review on health hazards, socioeconomic impacts and implications. *Hygiene and Environmental Health Advances*, 2, 100004.
- Ramos, W., Ortega, L.A.G., Díaz, J., De La Cruz, V.J.A., Tello, M., Ronceros, G., Loayza, M., & Gutierrez, E.L. (2022). Arsenicism by chronic exposure to mine tailings in Peru: An analysis of 17 cases with lesions on skin and/or annexes. *Clinical, Cosmetic and Investigational Dermatology*, 15, 2407–2414.
- Servicio Nacional de Sanidad Agraria: SENASA. (2023). Guía técnica para la toma de muestras biológicas en animales domésticos y productos pecuarios. Lima, Perú: Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego (MIDAGRI). https://www.gob.pe/institucion/senasa/informes-publicaciones/1241777-formato-de-remision-de-muestras-biologicas?utm_source=chatgpt.com
- Stewart, A.G., & Wilkinson, E. (2020). Population health screening after environmental pollution. *Geosciences*, 10, 477.
- U.S. Environmental Protection Agency: USEPA. (1994). Method 200.8: Determination of trace elements in waters and wastes by inductively coupled plasma – mass spectrometry (ICP–MS). Revision 5.4. Environmental Monitoring Systems Laboratory, Office of Research and Development, Cincinnati, OH, USA.
- United States Environmental Protection Agency: USEPA. (2019). *Regional screening levels (RSLs) – Generic tables for human health risk assessment*. U.S. Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov/risk/regional-screening-levels-rsls-generic-tables>
- Zhao, D., Wang, L., & Zhao, F.J. (2024). Toxic metals and metalloids in food: Current status, health risks, and mitigation strategies. *Current Environmental Health Reports*, 11, 468–483.

Received September 17, 2025.

Accepted October 31, 2025.