- 1 The Biologist (Lima), 2025, vol. 23 (2), XX-XX.
- 2 DOI: https://doi.org/10.62430/rtb20252322026
- 3 Este artículo es publicado por la revista The Biologist (Lima) de la Facultad de Ciencias Naturales y Matemática,
- 4 Universidad Nacional Federico Villarreal, Lima, Perú. Este es un artículo de acceso abierto, distribuido bajo los
- 5 términos de la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0) [https://
- 6 creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.es] que permite el uso, distribución y reproducción en cualquier medio,
- 7 siempre que la obra original sea debidamente citada de su fuente original.



10

13

14

15 16 17

18

24

25

27

31

32

34

36

37

38

39

40

9 ORIGINAL ARTÍCULO ORIGINAL

11 ENVIRONMENTAL EPIDEMIOLOGICAL RISK OF ARSENIC IN THE 12 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

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

²Centro de Investigaciones Avanzadas y Formación Superior en Educación, Salud y

23 Medio Ambiente "AMTAWI". Ica, Perú. george.argota@gmail.com

*Corresponding Author: rsosav@unam.edu.pe

26 Running Head: Environmental epidemiological risk of arsenic

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

29 René Germán Sosa-Vilca: Phttps://orcid.org/0000-0003-2248-3464

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

ABSTRACT

33 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 $0.095 \pm$

0.012 mg/L in the Tambo River, exceeding the regulatory limit (0.010 mg/L) by 9.5 to

- 41 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
- 44 metalloid and its trophic transfer. It was concluded that arsenic contamination in
- 45 Moquegua constitutes a structural environmental epidemiological risk, highlighting the
- 46 need to adjust Peruvian regulations and strengthen intersectoral health surveillance.
- 47 **Keywords**: arsenic bioaccumulation environmental contamination environmental
- 48 epidemiology Moquegua

RESUMEN

- 51 El estudio analizó el riesgo epidemiológico ambiental del arsénico en la región de
- 52 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
- 55 Sánchez Cerro) y Tambo (provincia de Mariscal Nieto). Las concentraciones de arsénico
- se determinaron mediante espectrometría de absorción atómica con generación de
- 57 hidruros (HGAAS). Los resultados mostraron concentraciones promedio de 0,123 ±
- 58 0.015 mg/L en el río Coralaque y $0.095 \pm 0.012 \text{ mg/L}$ en el río Tambo, superando entre
- 59 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 ± 3.7 mg/kg, mientras que en leche bovina y pelo de ganado se
- registraron 0.0916 ± 0.046 mg/kg y 0.9616 ± 0.53 mg/kg, respectivamente. Estos valores
- 62 confirmaron la bioacumulación del metaloide y su transferencia trófica. Se concluyó que,
- la contaminación por arsénico en Moquegua constituye un riesgo epidemiológico
- 64 ambiental estructural, reforzando la necesidad de ajustar la normativa peruana y fortalecer
- 65 la vigilancia sanitaria intersectorial.
- 66 Palabras clave: arsénico bioacumulación contaminación ambiental epidemiología
- 67 ambiental Moquegua

68 69

INTRODUCCIÓN

- 70 El estudio del riesgo epidemiológico ambiental se ha consolidado como un campo
- 71 transdisciplinar que articula la toxicología ambiental, la salud pública y la gestión del
- 72 territorio (Cannon, 2020; Deglin et al., 2021). En este marco, la contaminación por
- 73 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) 75 76 ocupa un lugar central debido a su ubicuidad geológica, su persistencia química y su reconocida capacidad carcinogénica (Chen & Costa, 2021; Philip & Chhabra, 2022). 77 En el contexto latinoamericano, la exposición crónica al arsénico ha sido ampliamente 78 79 documentada en diversos países durante los últimos años, consolidando un patrón regional de riesgo ambiental y sanitario. En Argentina, investigaciones hidrogeoquímicas 80 81 recientes confirmaron concentraciones elevadas de As en acuíferos de la provincia de La 82 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 83 del As en las regiones de Antofagasta y Atacama continúa representando un riesgo para 84 la salud pública; investigaciones sobre gobernanza ambiental han evidenciado que, pese 85 a las mejoras regulatorias, subsisten fuentes naturales y antropogénicas de exposición 86 (Ibarra et al., 2018). En México, recientes análisis geoquímicos identificaron tendencias 87 ascendentes de As en aguas subterráneas del centro del país, vinculadas tanto a la 88 composición litológica como a la sobreexplotación de acuíferos, alcanzando 89 concentraciones de hasta 180 µg/L (Morales et al., 2023). Finalmente, en Perú, estudios 90 efectuados en la región minera de Moquegua reportaron acumulación de metales 91 potencialmente tóxicos y metaloides, incluido As, en suelos agrícolas y cultivos 92 alimentarios, confirmando un proceso de exposición ambiental con potencial efecto 93 epidemiológico (Bedoya et al., 2023a). 94 En conjunto, estos hallazgos recientes refuerzan que la problemática del As en América 95 Latina constituye un fenómeno estructural, derivado tanto de condiciones hidrogeológicas 96 naturales como de la expansión de actividades extractivas, lo que demanda enfoques 97 epidemiológicos y regulatorios integrados. Estas situaciones plantean desafíos que 98 exceden el ámbito local y demandan una lectura epidemiológica integrada, capaz de 99 100 relacionar las dinámicas ambientales con los efectos en la salud humana y la sostenibilidad de los ecosistemas (Monteiro De Oliveira et al., 2021). 101 102 En el Perú, la convergencia entre intensa actividad minera, deficiente fiscalización ambiental y debilidad institucional ha favorecido la acumulación histórica de metales 103 pesados en distintas regiones (Ramos et al., 2022). Moquegua, situada en la zona sur 104 105 andina del Perú, constituye un caso paradigmático donde la intensa actividad minera 106 coexiste con ecosistemas frágiles y comunidades expuestas a fuentes geotérmicas y 107 relaves mineros, evidenciándose concentraciones de arsénico que superan los estándares 108 internacionales de calidad ambiental (Bedoya et al., 2023b).

El riesgo epidemiológico se manifiesta en la contaminación de los cuerpos de agua, suelos 109 110 y alimentos, así como en la detección del metaloide en fluidos biológicos humanos (Das 111 Sarkar et al., 2022). Se evidencia un vacío en los estudios integradores que vinculen la evidencia ambiental 112 con indicadores epidemiológicos y marcos normativos. Aunque existen registros 113 fragmentarios de monitoreo ambiental y tamizaje poblacional, pocos trabajos han 114 115 explorado el carácter estructural del problema, su evolución temporal y sus implicaciones 116 en salud pública. Esta insuficiencia justifica la necesidad de un enfoque analítico que 117 combine evidencia técnica, epidemiológica y regulatoria (Stewart & Wilkinson, 2020; 118 Brander, 2022; López et al., 2024). El problema central radica en la persistencia del As en el ambiente y su incorporación en 119 la cadena alimentaria, configurando un escenario de exposición crónica en comunidades 120 121 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 122 123 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 124 125 (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 126 salud y la epidemiología ambiental crítica, que reconocen la interdependencia entre 127 sistemas ecológicos y sociales (Parkes et al., 2020). Su coherencia metodológica se 128 fundamenta en la articulación de datos empíricos y análisis comparativo, garantizando 129 consistencia interna y validez académica en el ámbito de la comunicación científica 130 internacional (Lorenzini et al., 2024). 131 132

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

134

135

133

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

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

147

148

149

150

151

152

153

154

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° , -70.92° ; 4 250 msnm) corresponde a un curso altoandino de origen geotérmico con influencia minera. El río Tambo (-17.09° , -71.09° ; 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 arsénico.

155 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 156 157 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 158 159 Torata, Tumilaca y Samegua), entonces esta área resulta más representativa para evaluar matrices agropecuarias como el suelo, leche, pelo. Por tanto, se consideró 15 muestras de 160 suelo agrícola, 10 muestras de leche bovina y cinco muestras de pelo de ganado, 161 representando los componentes más relevantes de la interacción entre ambiente, 162 producción agropecuaria y salud pública. La frecuencia de muestreo fue bimensual entre 163 enero y agosto de 2025, permitiendo captar la variabilidad estacional asociada a periodos 164 de estiaje y lluvias. 165

166 En el caso del agua superficial, se establecieron tres puntos por cuenca, analizándose 167 como una sola muestra de tipo compuesta. Las muestras de suelo agrícola se obtuvieron 168 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 169 170 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 171 172 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 173 174 humano.

Las muestras de agua se recolectaron siguiendo el protocolo EPA Method 200.8 (USEPA,

176 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

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.

214

215

RESULTADOS

216 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 217 218 2025 en los ríos Coralaque (provincia General Sánchez Cerro) y Tambo (provincia 219 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 220 Ambiental del Perú definidos por el Decreto Supremo N.º 015-2015-MINAM. Las 221 concentraciones registradas en ambos ríos fueron superiores al valor internacional 222 223 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 224 225 condiciones de exposición prolongada. En el río Coralaque, la concentración promedio registrada fue de 0.123 ± 0.015 mg/L, lo 226 227 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 ± 0.012 mg/L, equivalente a 9.5 veces el 228 valor internacional de referencia. 229 Estos resultados indican una contaminación ambiental significativa con riesgo 230 epidemiológico, debido a que, si bien los valores cumplen con el estándar nacional 231 vigente, la exposición prolongada a concentraciones por encima del umbral internacional 232 implica un potencial daño crónico en la salud de las poblaciones ribereñas, 233 particularmente en comunidades que utilizan estas aguas para el consumo humano, el 234 riego agrícola y la ganadería. La discrepancia entre los límites nacionales y las 235 236 recomendaciones internacionales pone de manifiesto una brecha normativa crítica que condiciones 237 permite de contaminación "legalmente aceptadas", 238 epidemiológicamente peligrosas para la salud pública y la sostenibilidad ambiental en

240

239

Moquegua.

241

242

243

245

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

247248

249

250

251

252

253

254

255

256

257

258

259

260

261

262

263

264

265

266

267

268

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 ± 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 ± 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 ± 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	Fuente
			internacional	
Suelo agrícola	15	$22.8 \pm 3.7 \text{ mg/kg}$	≤ 20 mg/kg	USEPA (2019)
Leche bovina	10	$0.0916 \pm 0.046 \text{ mg/kg}$	\leq 0,05 mg/kg	EFSA (2022)
Pelo de ganado	5	$0.9616 \pm 0.53 \text{ mg/kg}$	< 0.5 mg/kg	ATSDR (2020)

277

278

279

280

281

282

283

284

285

286

287

288

289

290

291

292

293

294

295

296

297

298

299

300

301

302

272

273274

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 arsénico 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 303 304 complejidad del escenario ambiental. En contraste, investigaciones realizadas en México y Bangladesh mostraron que las comunidades con exposición prolongada a niveles 305 comparables desarrollaron tasas elevadas de cáncer de piel, vejiga y pulmón (Rahaman 306 et al., 2022), lo que permite inferir que las poblaciones moqueguanas enfrentan un riesgo 307 sanitario semejante si no se adoptan medidas de mitigación urgentes. 308 309 El análisis de las matrices ambientales complementarias ofreció evidencia adicional de 310 un proceso de bioacumulación y transferencia trófica del arsénico. Los valores detectados 311 en suelo agrícola del valle de Torata $(22.8 \pm 3.7 \text{ mg/kg})$ superaron el límite de 20 mg/kg 312 fijado por la USEPA (2019), indicando una contaminación difusa compatible con 313 irrigación mediante aguas contaminadas. Este resultado corroboró la hipótesis de una ruta indirecta de exposición humana a través de los sistemas agroalimentarios. Desde una 314 315 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 316 hacia cultivos y productos pecuarios. 317 En el caso de la leche bovina, la concentración de As promedio de 0.0916 ± 0.046 mg/kg 318 319 duplicó el valor de referencia de la EFSA (2022), lo cual coincidió con observaciones 320 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 321 leche y forraje. Este paralelismo reforzó la validez de la interpretación local y subrayó la 322 urgencia de implementar controles de calidad alimentaria en la región. De igual modo, el 323 324 pelo de ganado, con una concentración de As promedio de 0.9616 ± 0.53 mg/kg, superó casi el doble del valor toxicológico de referencia de la ATSDR (2020), lo que representó 325 un indicador biológico robusto de exposición crónica. Estos hallazgos fueron congruentes 326 con los reportes de Chen & Costa (2021), quienes destacaron que los biomarcadores 327 328 animales son excelentes predictores del riesgo poblacional en contextos de exposición 329 ambiental prolongada. 330 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 331 332 seguridad alimentaria y la salud pública. El patrón de contaminación revelado sugiere un ciclo de retroalimentación entre la degradación ambiental y la vulnerabilidad 333 334 epidemiológica, en el que los mecanismos de vigilancia institucional resultaron insuficientes o fragmentados. La falta de alineamiento entre los valores nacionales y las 335 336 recomendaciones internacionales generó una brecha de gobernanza ambiental que, como

señaló Stewart & Wilkinson (2020), debilita la capacidad de los Estados para responder 337 338 ante emergencias toxicológicas de carácter estructural. 339 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 340 XXI. La evidencia internacional indica que las regiones con modelos extractivos 341 intensivos, como las del sur andino, tienden a mostrar correlaciones entre exposición 342 343 ambiental y prevalencia de patologías crónicas (Philip & Chhabra, 2022). La coincidencia 344 de los valores observados en Moquegua con los reportes de Argentina, Chile y México sugiere un patrón regional que combina vulnerabilidad geológica, deficiencia regulatoria 345 346 y exposición social acumulativa. Sin embargo, el presente estudio aportó una visión 347 integrada del riesgo epidemiológico ambiental al vincular cuantitativamente la contaminación de matrices ambientales con la evidencia biológica y normativa, 348 349 superando los enfoques fragmentarios que han predominado en estudios previos. En términos de aportes teóricos, el estudio contribuyó a la consolidación de la 350 351 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 352 353 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 354 naturales o industriales, sino de la interacción entre un entorno regulatorio laxo y una 355 respuesta sanitaria insuficiente. De este modo, la investigación aporta evidencia para 356 357 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 358 359 salud. Los hallazgos confirmaron la existencia de un escenario de riesgo epidemiológico 360 361 ambiental estructural en Moquegua, sustentado en la bioacumulación del As en diferentes 362 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 363 364 los resultados con estudios previos otorgan solidez científica al análisis. Desde una perspectiva disciplinaria, este estudio resultó pertinente y relevante para la salud 365 366 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 367 368 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 371 372 de muestreo entre enero y agosto de 2025. Esta delimitación impidió observar posibles variaciones estacionales que podrían influir en la dinámica hidrogeoquímica del arsénico, 373 374 especialmente en zonas con fluctuaciones de caudal o actividad minera variable. Asimismo, el análisis se basó en muestras ambientales representativas, sin incorporar 375 biomonitoreo humano directo, lo que restringe la cuantificación precisa del riesgo 376 377 individual. No obstante, estas limitaciones no comprometen la validez ni la robustez de 378 los hallazgos, ya que el diseño descriptivo y la triangulación de fuentes garantizaron la 379 consistencia de las conclusiones sobre la magnitud y el carácter estructural del riesgo 380 epidemiológico ambiental en Moquegua. 381 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 382 383 y productos pecuarios, lo que evidencia un proceso activo de bioacumulación con potencial impacto en la salud humana y la seguridad alimentaria. Las concentraciones 384 385 detectadas en los ríos Coralaque y Tambo de Moquegua, superaron ampliamente los valores guía internacionales, mientras que los niveles hallados en suelos y productos 386 agropecuarios confirmaron la transferencia trófica del contaminante. Esta situación, aun 387 cuando se encuentra dentro de los límites legales nacionales, resulta epidemiológicamente 388 peligrosa, al reflejar una brecha normativa que permite condiciones de exposición crónica 389 bajo apariencia de cumplimiento regulatorio. 390 Los resultados validaron la coherencia entre los procedimientos analíticos, los supuestos 391 del estudio y la evidencia empírica obtenida, consolidando un enfoque integral de la 392 epidemiología ambiental aplicada a contextos mineros. En términos prácticos, la 393 394 investigación aporta fundamentos sólidos para revisar los estándares peruanos de calidad ambiental, fortalecer la vigilancia epidemiológica en zonas mineras activas y promover 395 396 estrategias intersectoriales de prevención y mitigación del riesgo. En consecuencia, el caso de Moquegua se configura como un referente nacional para comprender y gestionar 397 398 los efectos sinérgicos entre contaminación ambiental, exposición humana y gobernanza sanitaria, contribuyendo de manera significativa al campo de la salud ambiental y la 399

401 402

400

Author contribution: CRediT (Contributor Roles Taxonomy)

403 **MARS** = Manuel Aníbal Rodríguez-Salas

toxicología del arsénico en América Latina.

404 **RGSV** = René Germán Sosa-Vilca

405 406	GAP = George Argota-Pérez
407	Conceptualization: MARS
408	Data curation: MARS
409	Formal Analysis: MARS
410	Funding acquisition: MARS
411	Investigation: MARS
412	Methodology: MARS, RGSV
413	Project administration: MARS
414	Resources: MARS
415	Software: MARS, RGSV
416	Supervision: MARS, RGSV
417	Validation: MARS, RGSV
418	Visualization: MARS, RGSV
419	Writing – original draft: MARS, RGSV, GAP
420	Writing – review & editing: GAP
421	
422	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS
423	Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). (2020). Toxicological
424	profile for arsenic. U.S. Department of Health and Human Services, Public Health
425	Service. Disponible en: https://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp2.pdf
426	Ali, H., Khan, E., & Ilahi, I. (2019). Environmental chemistry and ecotoxicology of
427	hazardous heavy metals: Environmental persistence, toxicity, and bioaccumulation.
428	Journal of Chemistry, 2019, 1–14.
429	Aullón, A.A., Schulz, C., Bundschuh, J., Jacks, G., Thunvik, R., Gustafsson, J.P., &
430	Magnus, M.C. (2020). Hydrogeochemical controls on the mobility of arsenic,
431	fluoride and other geogenic co-contaminants in the shallow aquifers of northeastern
432	La Pampa Province in Argentina. Science of The Total Environment, 715, 136671.
433	Bedoya, P.N.S., Neimaier, A., Maus, D., Escobedo, P.E., Eduardo, K., & Pumi, G.
434	(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.
- 439 *Scientific Data*, 10, 523.
- Brander, S.M. (2022). Rethinking our chemical legacy and reclaiming our planet. *One*
- 441 Earth, 5, 316–319.
- 442 Cannon, C. (2020). Towards convergence: How to do transdisciplinary environmental
- health disparities Rresearch. International Journal of Environmental Research and
- 444 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.
- 448 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.
- 450 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
- 454 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*
- 457 *Epidemiology*, 3, 100048.
- 458 Dirección Regional de Salud de Moquegua: DIRESA. (2023). Informe anual de
- vigilancia epidemiológica y control de exposición a metales pesados y metaloides
- 460 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.
- 464 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
- 466 Chile. *Environmental Science & Policy*, 86, 115–124.

- 467 International Organization for Standardization- ISO. (1995). ISO 11466:1995. Soil
- 468 quality Extraction of trace elements soluble in aqua regia. Geneva, Switzerland:
- 469 International Organization for Standardization.
- 470 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
- 473 to achieve rigor and data integration in mixed methods research. *Investigación y*
- 474 Educación en Enfermería, 42, e02.
- 475 Ministerio del Ambiente: MINAM. (2015). Decreto Supremo N.º 015-2015-MINAM:
- 476 Aprueban los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para agua y establecen
- 477 disposiciones complementarias. Diario Oficial El Peruano
- https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2015/12/Decreto-Supremo-
- 479 N%C2%B0-015-2015-MINAM.pdf
- 480 Monteiro De Oliveira, E.C., Caixeta, E.S., Vieira Santos, V.S., & Barbosa, P.B. (2021).
- 481 Arsenic exposure from groundwater: environmental contamination, human health
- 482 effects, and sustainable solutions. Journal of Toxicology and Environmental
- 483 *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.
- 485 (2023). Upward trends and lithological and climatic controls of groundwater
- arsenic, fluoride, and nitrate in central Mexico. *Minerals*, 13, 1145.
- 487 Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental: OEFA. (2024). Reporte técnico de
- 488 calidad ambiental en zonas de influencia minera de la región Moquegua.
- Ministerio del Ambiente. https://repositorio.oefa.gob.pe/items/08971adc-6a62-
- 490 41e8-a466-10b92ab1c801
- 491 Organización Mundial de la Salud (OMS / WHO). (2022). Guidelines for drinking-water
- 492 quality: Fourth edition incorporating the first and second addenda. World Health
- 493 Organization. https://iris.who.int/server/api/core/bitstreams/69c17edd-ee26-425b-
- 494 9d34-33799377e886/content
- 495 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–
- 499 64.

- Patel, K.S., Pandey, P., Martín, R.P., Corns, W.T., Varol, S., Bhattacharya, S., & Zhu, Y.
- 501 (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.
- 507 *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.
- 512 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
- 517 Stewart, A.G., & Wilkinson, E. (2020). Population health screening after environmental
- pollution. *Geosciences*, 10, 477.
- 519 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.
- 523 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-
- 526 levels-rsls-generic-tables
- 527 Zhao, D., Wang, L., & Zhao, F.J. (2024). Toxic metals and metalloids in food: Current
- status, health risks, and mitigation strategies. Current Environmental Health
- 529 *Reports*, 11, 468–483.
- Received September 17, 2025.
- Accepted October 31, 2025.