

Revisión sistemática sobre la contaminación por metales pesados de suelos agrícolas del Perú

Samuel Pacheco-Marchán

<https://orcid.org/0009-0003-2381-8606>
spachecon@untumbes.edu.pe
Universidad Nacional de Tumbes
Tumbes, Perú

Luis A. Bermejo

<https://orcid.org/0000-0001-5294-7034>
lbermejor@untumbes.edu.pe
Universidad Nacional de Tumbes
Tumbes, Perú

Nicole Vergara-Alfaro

<https://orcid.org/0009-0005-7465-3957>
180364161@untumbes.edu.pe
Universidad Nacional de Tumbes
Tumbes, Perú

Cristhofer Villar-Cruz

<https://orcid.org/0009-0009-3325-8896>
180605191@untumbes.edu.pe
Universidad Nacional de Tumbes
Tumbes, Perú

Alberto Ordinola-Zapata*

<https://orcid.org/0000-0002-9644-0531>
aordinolaz@untumbes.edu.pe
Universidad Nacional de Tumbes
Tumbes, Perú

*Autor de correspondencia: aordinolaz@untumbes.edu.pe

Recibido (11/09/2025), Aceptado (03/12/2025)

Resumen. Este estudio tuvo como objetivo evaluar la contaminación por metales pesados en suelos agrícolas del Perú, identificar vacíos de investigación y consolidar una base científica para futuras líneas de trabajo. Se realizó una revisión sistemática siguiendo los lineamientos PRISMA, consultando cinco bases de datos bibliográficas, el motor de búsqueda Google Académico y cinco herramientas de inteligencia artificial. Se analizaron 49 documentos, con mayor número de estudios en la sierra central y en cultivos de cacao, papa, cereales y hortalizas. Se observó presencia de cadmio, plomo y arsénico que superaron los estándares nacionales. Aunque, no se encontraron investigaciones que apliquen especiación química secuencial, bioensayos de biodisponibilidad o modelos de transporte, lo que limita la comprensión integral del riesgo ambiental y sanitario. En conclusión, es necesario incorporar metodologías complementarias, fortalecer la transparencia ambiental y promover una articulación entre academia, estado y sector productivo para garantizar la sostenibilidad agrícola y la seguridad alimentaria.

Palabras clave: metales pesados, suelo agrícola, análisis bibliométrico.

Systematic Review on Heavy Metal Contamination of Agricultural Soils in Peru

Abstract. This study aimed to assess heavy metal contamination in agricultural soils of Peru, identify research gaps, and consolidate a scientific basis for future research lines. A systematic review was conducted following PRISMA guidelines, consulting five bibliographic databases, the Google Scholar search engine, and five artificial intelligence tools. A total of 49 documents were analyzed, with a higher number of studies concentrated in the central highlands and focused on crops such as cacao, potato, cereals, and vegetables. The presence of cadmium, lead, and arsenic exceeding national standards was identified. However, no studies were found applying sequential chemical speciation, bioavailability bioassays, or transport models, which limits a comprehensive understanding of environmental and health risks. In conclusion, it is necessary to incorporate complementary methodologies, strengthen environmental transparency, and promote coordination among academia, the state, and the productive sector to ensure agricultural sustainability and food security.

Keywords: heavy metals, agricultural soil, bibliometric analysis.



I. INTRODUCCIÓN

La seguridad alimentaria mundial enfrenta riesgos por la presencia de poluentes tales como los metales pesados [1], que ingresan a los alimentos desde suelos agrícolas contaminados por la minería, la industria, la quema de combustibles e incluso las prácticas agrícolas [2]. La presencia de metales en los suelos perjudica su fertilidad, su microbiota, reducen el rendimiento de sus cultivos y amenazan a la salud humana [2]. Los metales pesados de mayor impacto son los xenobióticos (cadmio, plomo, arsénico, mercurio, cromo), sin función conocida en los organismos y contaminantes en cualquier concentración, ellos alteran la fisiología de los cultivares, disminuyendo su productividad y valor nutricional [2].

Además de su rol esencial en la seguridad alimentaria, los suelos agrícolas enfrentan amenazas por metales pesados [2], que ingresan por la minería [3], efluentes, residuos sólidos, pesticidas, fertilizantes y deposición atmosférica; aunque también por fuentes naturales como litogénesis, erosión, meteorización y otros procesos geológicos [1]. Se estima que más de cinco millones de suelos agrícolas en el mundo están contaminados por metales pesados; en India, China y Egipto, gran parte exceden los estándares de calidad para cadmio, plomo y arsénico [4].

Perú es uno de los países en que coexisten actividades mineras y agrícolas en zonas comunes, lo que propicia la contaminación de los suelos de cultivo. Perú se encuentra entre los cinco primeros productores mundiales de oro, plata, cobre, zinc, molibdeno y plomo [5]. También cuenta con una producción agrícola importante que exporta arándanos, uvas, aguacates, espárragos, alcachofas y cacao [6]; y para consumo interno, arroz, maíz, cebada y papa [3], [7]. El incremento de metales pesados en suelos agrícolas [1] afecta a los cultivos reduciendo su desarrollo, alterando su contenido nutricional y amenazando a la salud de los consumidores [2].

A pesar de la importancia del tema en cuestión, no se ha encontrado una revisión bibliográfica sistemática que evalúe, consolide y estructure el estado actual de la investigación respecto específicamente a la presencia de metales pesados en suelos agrícolas del Perú. Existen revisiones que se centran en cultivos específicos o que abordan el tema en una región del Perú, sin abarcar todo su territorio; por lo que es necesario realizar una revisión que consolide la información a la fecha a fin de obtener una panorámica integral del tema en todo el país.

Por ello, este trabajo busca identificar patrones de contaminación, señalar vacíos en la literatura y proveer una base consolidada que oriente futuras investigaciones y decisiones estatales. Este artículo se ha dividido en cuatro secciones: en la primera se explica el problema abordado relacionado con la contaminación por metales pesados en suelos agrícolas del Perú; en la segunda se incrementa la información teórica relacionada con la temática; en la tercera se describe el método utilizado; y finalmente, en la cuarta se detallan los resultados y conclusiones.

II. MARCO TEÓRICO

La contaminación por metales pesados en suelos agrícolas es un problema global que afecta a los terrenos de cultivos. Los niveles de cadmio, plomo y arsénico superan los niveles máximos en numerosos países como por ejemplo China, India, Francia, Reino Unido y Egipto. Las principales fuentes de estos contaminantes son la deposición atmosférica, fertilizantes, pesticidas, aguas residuales y estiércol animal, variando según la región [4].

Estos contaminantes tienen alta densidad (superior a 5 g/cm³) y número atómico (mayor a 20). Aunque se hallan en la corteza terrestre en baja proporción (0,1% a 0,01%), su concentración puede aumentar mucho por actividades antrópicas como la minería y la agricultura, especialmente por fertilizantes y pesticidas [2].

Los metales pesados son un grupo de elementos químicos, como aluminio, bario, berilio, cadmio, cobalto, cobre, cromo, estaño, hierro, manganeso, mercurio, molibdeno, níquel, oro, plata, talio, vanadio y zinc; entre los que se incluyen metaloides o no metales como arsénico y selenio [8], [9]. A diferencia de los contaminantes orgánicos, tienen persistencia ilimitada en el medio ambiente. El suelo es su principal reservorio y vía de transferencia hacia la biota [2]. Los metales xenobióticos (cadmio, plomo, arsénico y mercurio) son los más preocupantes, pues carecen de función biológica y son tóxicos en bajas concentraciones [1], [10].

Los metales pesados afectan las principales regiones agrícolas del Perú, donde su acumulación

compromete la inocuidad de los alimentos y la sostenibilidad de los sistemas productivos [11]. Se originan principalmente por la minería, por el uso de fertilizantes fosfatados (que poseen trazas de cadmio) y por emisiones aéreas [1], [3]. Sus efectos en la salud son variados: el cadmio genera daño renal, pulmonar, óseo y hepático [12]; el plomo es neurotóxico, eleva la presión arterial y produce debilidad ósea [10]; y el arsénico afecta el desarrollo neurológico infantil, comprometiendo los sistemas gastrointestinal, dérmico, nervioso, renal y visual [1].

La toxicidad de los metales depende de su biodisponibilidad (fracción capaz de ser absorbida por las plantas), regulada por pH, textura y materia orgánica del suelo (MO). En suelos ácidos, la solubilidad de Cd²⁺ y Pb²⁺ aumenta, favoreciendo su absorción, mientras que la MO puede inmovilizarlos al quelarlos. La fitoabsorción ocurre por competencia: Cd²⁺ emplea transportadores del Zn²⁺ en la raíz y el arseniato (AsO₄³⁻) compite con los del fosfato (PO₄³⁻) [2].

Para proteger a los suelos agrícolas de estos elementos, países como Estados Unidos, China, Reino Unido, Japón y Canadá desarrollaron estándares de calidad ambiental basados en indicadores de riesgos para la salud y el ambiente [4]. En el Perú, el Decreto Supremo N° 011-2017-MINAM estableció estándares de calidad ambiental (50 mg/kg para arsénico, 1,4 mg/kg para cadmio, 0,4 mg/kg para cromo VI, 6,6 mg/kg para mercurio y 70 mg/kg para plomo) con valores similares a los de Canadá, salvo en arsénico, donde Canadá estableció 12 mg/kg [8], [13].

Varios cultivos de alta rentabilidad como cacao (*Theobroma cacao*), aguacate (*Persea americana*) y arándanos (*Vaccinium corymbosum*) [6] son acumuladores moderados de cadmio [12]. El riesgo aumenta por la cercanía entre actividades mineras y agrícolas en ciertas zonas del Perú [11]. La bioacumulación en tejidos comestibles es el principal mecanismo de transferencia a humanos y, cuando se exceden los límites máximos permisibles (LMP) de la Unión Europea, se producen pérdidas comerciales para el Perú, como los envíos rechazados de banano orgánico, harina de maíz, espárragos, aguacate y maca en 2022 [14].

Para evitar el rechazo de productos agrícolas, se debe evaluar si los suelos cumplen con los ECA para metales pesados según la normativa peruana e internacional [9]. Sin embargo, la acción estatal se ve limitada por la fragmentación y el escaso alcance geográfico, lo que justifica esta revisión sistemática como punto de partida para una gestión ambiental más proactiva.

III. METODOLOGÍA

La revisión sistemática se realizó siguiendo la guía dada por *Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses (PRISMA)*. Se diseñó la siguiente cadena de consulta:

("heavy metal" OR "heavy metals" OR "toxic metals") AND ("agricultural soil" OR "farming soil" OR "cultivated soil" OR "crop soil") AND ("Peru").

La cadena de consulta se utilizó para realizar la búsqueda en cuatro bases de datos: *Scopus*, *Web of Science*, *ScienceDirect*, *PubMed* y en el motor de búsqueda *Google Académico* (Figura 1). Los registros obtenidos se depuraron eliminando los duplicados y posteriormente filtrándolos con los criterios de inclusión y exclusión siguientes:

Criterio de inclusión: documentos que reporten de manera cuantitativa metales pesados en suelos agrícolas del Perú, en cualquier idioma y que sean de acceso abierto.

Criterios de exclusión: documentos que reporten metales pesados en otros países; reportes cualitativos; artículos de revisión, *preprint* o retractados.

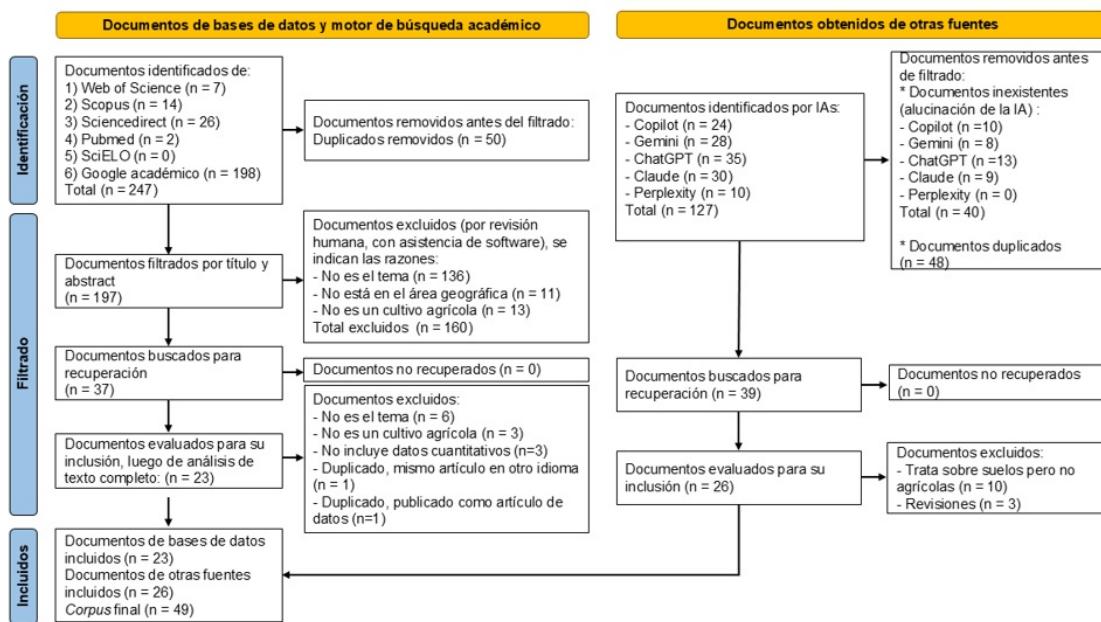


Fig. 1. Flujograma PRISMA para selección de documentos para la revisión bibliográfica.

El filtrado se realizó en dos etapas: primero por título y resumen, y segundo por revisión del texto completo. Adicionalmente, se realizó una búsqueda complementaria, utilizando cinco agentes de inteligencia artificial (IA): *Copilot*, *Gemini*, *ChatGPT*, *Claude* y *Perplexity*. La consulta a las bases de datos obtuvo 247 registros, que luego de la depuración y filtrado se redujeron a 23. En tanto que, de 127 documentos detectados por agentes de IA, 26 cumplieron los criterios para ser incluidos, con lo que el corpus documental final fue de 49 registros.

Finalmente, se elaboraron tablas y figuras sobre la distribución de publicaciones por región del país, departamento y tipo de cultivo; así como se evaluaron las principales temáticas relacionadas con el conjunto de documentos analizado, comparándolas con las realizadas en otros países, a fin de identificar vacíos que conduzcan a nuevas líneas de investigación.

IV. RESULTADOS

El material analizado permite afirmar que la información publicada sobre el tema es reciente con menos de seis años, y en su mayoría corresponden a artículos científicos en inglés; indicando que se orientan a un público principalmente internacional y con estándares académicos consolidados. A nivel geográfico, los estudios se concentran en Junín, Huánuco y Amazonas (Figura 2). En Junín y Huánuco (sierra central del Perú), la coexistencia de agricultura y minería genera pasivos ambientales que afectan al suelo, especialmente por la contaminación del río Mantaro usado en irrigación [1]. En Amazonas, se ha reportado cadmio de origen natural en suelos de cultivo de cacao [7]; mientras que en cultivos de papa, la presencia de este metal se asocia al uso de fertilizantes [15]. El mayor número de investigaciones realizadas en la región de la sierra se debe a que las principales actividades mineras del Perú se efectúan en ella, las que se han producido por décadas y han incrementado el pasivo ambiental, incorporando metales pesados en aire y agua, que finalmente se depositan en los suelos agrícolas [5].

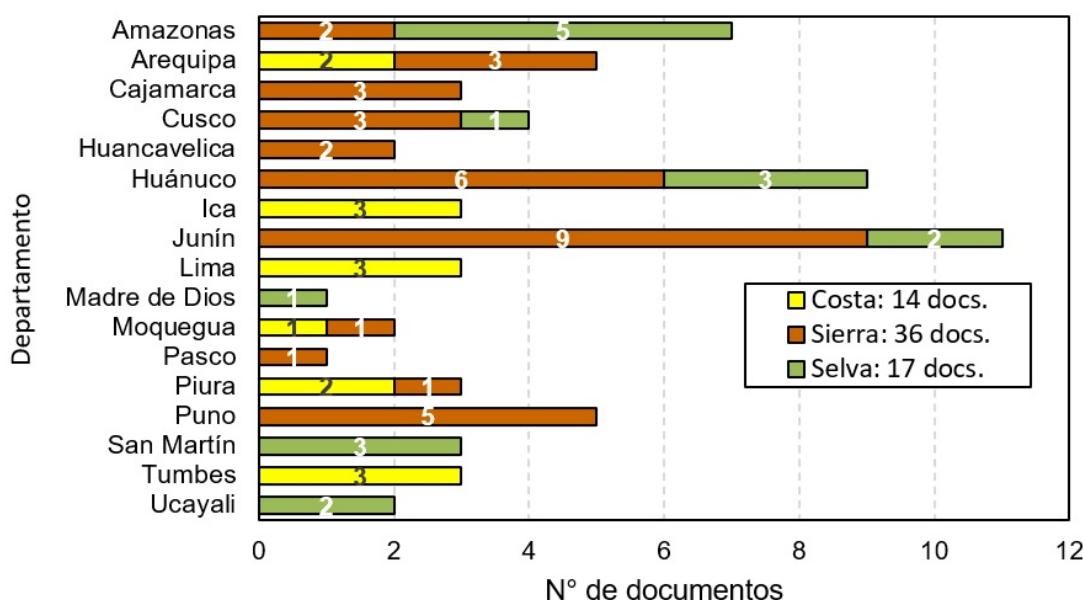


Fig. 2. Cantidad de documentos analizados por departamento y región geográfica.

Se observa que el 38,8% de los estudios no especifican el cultivo, lo que limita la aplicabilidad directa de los resultados. Entre los estudios que sí especifican el cultivo, la mayoría han abordado al cacao (*Theobroma cacao*) (Tabla 1), por su relevancia exportadora y las normas estrictas impuestas para su exportación [7]. Mientras que 28,5% correspondieron a productos agrícolas de consumo interno como arroz, papa, maíz, quinoa, ajo y cebolla, cuya alta frecuencia en la dieta justifica el interés por evaluar su inocuidad [9], [10].

Tabla 1. Cultivos evaluados y metales pesados y metaloides analizados.

Variable	N.º de publicaciones	%
Cultivo		
Cultivo sin especificar	19	38,8
Cacao	7	14,3
Cereales (cebada, arroz, quinoa, otros)	6	12,2
Hortalizas (ajo, cebolla, alcachofa, otras)	6	12,2
Papa	6	12,2
Maíz	2	4,1
Frutales	2	4,1
Otros (banano, leguminosas, forrajes, eucalipto, muña, espárragos, alcachofa, calabaza)	12	24,5
Total	49	100,0

Metales y metaloides		
Cadmio	42	85,7
Plomo	35	71,4
Arsénico	25	51,0
Mercurio	10	20,4
Cromo	8	16,3
Níquel	7	14,3
Otros	20	40,8
Total	49	100,0

Más de la mitad de estudios tratan sobre tres contaminantes: cadmio, plomo y arsénico (tabla 2); otros metales que han sido muy estudiados son el mercurio y cromo. En varios se han reportado concentraciones superiores a los correspondientes estándares de calidad ambiental (ECA) para suelos agrícolas establecidos por el Ministerio del Ambiente del Perú (plomo: 70 mg/kg, cadmio: 1,40 mg/kg

y arsénico: 50,0 mg/kg) [9] (tabla 3).

Tabla 2. Metales pesados y metaloides que excedieron sus respectivos ECA.

Metal o metaloide	Departamento	Cultivos	Concentración media (mg/kg)	ECA (mg/kg)	Referencias seleccionadas*
Arsénico	Moquegua	Papa, hortalizas y frutales*	20,70	50,00	[3]
	Huancavelica, Junín, Lima	No especificado	20,10–182,55		[16]
Cadmio	Amazonas	Cacao	1,56–1,70	1,40	[7], [15]
		Papa	1,93		
		Arroz	2,26		
	Huánuco	Cacao	1,63		[17], [18]
		Quinoa	2,37		
		Hortalizas	1,73		
	Ica, Junín, Lima	Espárragos	2,61–3,40		[12]
		Calabaza	3,51		
		Mandarina, maíz	1,50–1,77		
	Moquegua, Puno, Ucayali	Papa, hortalizas y frutales	4,20		[11], [16], [17]
		Papa	7,91		
		Cacao	1,63		
	Arequipa, Ica, Huancavelica, Junín, Lima, Puno	No especificado	1,42–7,91		[11], [16], [17]
Cromo (VI)	Cusco	Hortalizas	1,27	0,40	[8]
Mercurio	Puno	Pasto, avena	249,00–259,00	6,6	[19]
Plomo	Huánuco	Quinoa	120,29	70,00	[18]
	Junín	Maíz, cebada	91,60–163,80		[10]
		Alcachofa	125,5		[1]
	Moquegua	Papa, hortalizas y frutales*	16,60		[3]
	Cajamarca, Puno	No especificado	72,11–505,20		[1]
		Papa	505,20		

* Se muestran solo algunas de las 49 referencias que sustentan los valores reportados.

Con mayor frecuencia los ECA fueron excedidos en suelos de la sierra central del Perú, en la que por siglos se ha realizado extracción minera [1], [11]. La mayoría de los estudios reportan niveles de cadmio que exceden al ECA establecido por la legislación peruana (1,40 mg/kg) [9]; tal contaminante se ha evidenciado en cultivos como el cacao y productos de consumo interno.

No se ha encontrado ninguna investigación científica publicada por las grandes empresas de agroexportación, salvo sus reportes de sostenibilidad en los que afirman monitorear metales pesados en suelos, agua, vegetales y fertilizantes, aunque no precisan cuantitativamente el resultado de tales evaluaciones. Estas grandes empresas son responsables de los cultivos de uva, arándano y espárrago. Esto podría deberse a que dichas empresas realizan monitoreos ambientales internos, sin divulgar resultados en espacios académicos, priorizando el cumplimiento normativo y la inocuidad del producto final más que la investigación sobre los suelos [6].

Cultivos de exportación como el cacao, vinculado a pequeños productores, cuentan con más investigaciones disponibles, impulsadas por universidades y entidades de cooperación internacional, interesadas en la seguridad alimentaria, la sostenibilidad y el impacto ambiental. Sin embargo, en cultivos de mango, café y banano orgánico, también producidos por pequeños agricultores [6], no se hallaron estudios, posiblemente por una menor percepción del riesgo, limitaciones técnicas o enfoque en otros aspectos productivos (calidad, enfermedades y certificación orgánica). Esto indica que se necesita fortalecer la transparencia a nivel de calidad ambiental en cultivos de alto valor comercial.

La mayoría de los estudios se dedican a determinar la concentración de metales pesados en suelo, sin relacionarlo con otros análisis complementarios. Un grupo menor de investigaciones (Tabla 3) evalúa riesgo humano, geoestadística, bioacumulación, análisis multivariado y propuestas de remediación. Siete

estudios reportaron riesgos carcinogénicos en humanos (CR) bajos o nulos; sin embargo, en Junín y Huánuco el arsénico y el cadmio superaron 1×10^{-6} en niños, indicando riesgo crónico [10]. Estos resultados son preocupantes por cuanto se evidencia que en lugares específicos existe amenaza a la salud en los sujetos más vulnerables: los niños.

Tabla 3. Análisis complementarios asociados al estudio de metales pesados y metaloides en suelos agrícolas del Perú.

Análisis complementarios	Indicadores	N.º de docs.	Departamentos	Principales resultados
Evaluación de riesgo humano	- Cociente de riesgo (HQ) - Índice de riesgo (HI) - Riesgo carcinogénico (CR) - Índice de peligrosidad no carcinogénico (IP) - Índice de riesgo carcinogénico (IR)	7	Junín, Huánuco, Arequipa, Tumbes, Lima	- HI y HQ < 1 en la mayoría de casos (riesgo no carcinogénico bajo) - CR por As y Cd > 10^{-6} en niños (riesgo crónico) - IP>1 para As en Lima, riesgo inaceptable
Geoestadística y mapeo de riesgo	- Sistemas de información geográfica (GIS) - Fluorescencia de Rayos X portátil (FPXRF)	5	Amazonas, Arequipa, Lima, Huánuco, Ucayali	- Identificación de zonas críticas - Uso de mapas geoquímicos y tecnología de determinación de metales pesados en campo: FPXRF - Riesgo espacial por minería y fertilización
Bioacumulación y translocación	- Factor de bioacumulación (BF) - Factor de bio-concentración (BCF) - Factor de translocación (TF)	5	Cajamarca, Junín, Piura, Amazonas	- Pb y Cd se acumulan en raíces - Baja translocación a partes comestibles - Influencia de pH y textura

La Tabla 4 revela un aporte importante al estudio de los metales pesados; se puede observar en ella propuestas de fitorremediación y biorremediación, análisis multivariados, índices ecológicos y la influencia de propiedades edáficas. Estos estudios evidencian de manera general que las prácticas agrícolas influyen en la presencia de metales, así como evidencian concentraciones altas de estos contaminantes en zonas mineras y destacan el papel del pH, la materia orgánica y la capacidad de intercambio catiónico en la movilidad de los metales pesados.

Otro aspecto que se ha profundizado en algunas investigaciones es el uso de sistemas de información geográfica (*GIS*) y la tecnología de fluorescencia de rayos X portátil (*FPXRF*), esta última, una técnica no destructiva que es capaz de identificar metales pesados en campo a través de irradiar el suelo o rocas con rayos X y medir la radiación secundaria emitida por los elementos metálicos [13]. Esta técnica permitió identificar zonas críticas de acumulación en Arequipa, Lima y Ucayali, relacionadas a la minería y la fertilización intensiva [13]. Los estudios de bioacumulación y de translocación mostraron que el cadmio y el plomo se concentran en raíces, con baja movilidad hacia partes comestibles y es influenciada por el pH y la textura [7]. Algunos estudios aplicaron análisis multivariado a través del análisis de componentes principales (*PCA*), lo que permitió correlacionar el cadmio con la fertilización fosfatada y la textura arenosa, así como al arsénico con el zinc [17], [18].

La evaluación de ciertos índices ecológicos como el Índice de geo acumulación (*Igeo*), el factor de enriquecimiento (*EF*) y el índice de riesgo ecológico potencial (*RI*) mostraron un incremento importante de arsénico, cadmio y mercurio en zonas mineras [13]. Además, en cinco de los estudios se hicieron propuestas de fitorremediación, empleando gramíneas como el maíz, hortalizas como brócoli y cilantro, así como leguminosas como la alfalfa. Otras propuestas implican el uso de biorremediación con microorganismos, por ejemplo, micorrizas productoras de glomalina, un glicopéptido capaz de formar complejos con cadmio, plomo, cobre y zinc, lo que los inmoviliza en el suelo e impide su ingreso a las raíces [20].

Tabla 4. Análisis complementarios asociados al estudio de los metales pesados y metaloides en suelos agrícolas del Perú (Parte 2).

Análisis complementarios	Indicadores	N.º de docs.	Departamentos	Principales resultados
Propuestas de remediación (fitorre-mediación y biorre-mediación)	- Fitorre-mediación - Biorre-mediación con hongos y bacterias - Uso de enmiendas	5	Cusco, San Martín, Amazonas, Lima, Junín	- Fitorre-mediación viable con brócoli, cilantro, alfalfa - Micorrizas y GRSP fitoestabilizan metales - Biorre-mediación en cacao es viable con hongos y bacterias - Fitorre-mediación se puede realizar con plantas de maíz y enmiendas de Stevia
Ánalysis multivariado	Ánalysis de componentes principales (PCA)	4	Tumbes, Piura, Huánuco, Ucayali, Huancavelica	- Cd correlaciona con fertilización fosfatada y textura arenosa - As y Cd correlacionan negativamente con Zn
Índices ecológicos (Igeo, EF, RI)	- Índice de geo acumulación (Igeo) - Factor de enriquecimiento (EF) - Índice de riesgo ecológico potencial (RI)	4	Arequipa, Junín, Huancavelica	- Enriquecimiento severo de As y Cd - Igeo > 5 para Hg en zonas mineras - EF alto para As y Cd
Propiedades edáficas	- pH - Conductividad eléctrica (CE) - Capacidad de intercambio catiónico (CIC) - Acidez intercambiable ($H^+ + Al^{+3}$) - Materia orgánica (MO) - Carbono orgánico - Textura del suelo	4	Tumbes, Piura, Cajamarca, Amazonas, Huánuco, San Martín, Junín, Cuzco, Puno	- pH, CIC y MOS son los factores más determinantes en la dinámica de metales pesados - La acidez intercambiable es un indicador de riesgo - Textura y salinidad modulan la movilidad de metales pesados

Los estudios revisados muestran que las propiedades edáficas son importantes en la movilidad y biodisponibilidad de los metales pesados. Factores como el pH, la materia orgánica (MO) y la capacidad de intercambio catiónico (CIC) regulan la solubilidad y fijación de elementos como Cd y Pb. En suelos ácidos, la mayor solubilidad favorece la absorción por cultivos, mientras que la MO puede inmovilizar metales al formar complejos estables. La textura y la salinidad también modulan la dinámica, influyendo en la translocación hacia tejidos comestibles. Estos hallazgos sugieren que la variabilidad edáfica explica diferencias regionales en la contaminación agrícola y refuerzan la necesidad de integrar el estudio de estos parámetros de suelo en la evaluación de riesgos ambientales y alimentarios, como lo sugieren Anaya-Raymundo et al. [2].

Sin embargo, se identifican vacíos metodológicos importantes. Ningún estudio aplica métodos de especiación química secuencial como el de la Oficina de Referencia Comunitaria (BCR) o el Tessier, que son muy utilizados en Europa y América Latina para diferenciar entre fracciones móviles y estables de metales. Tampoco se han desarrollado bioensayos de biodisponibilidad con organismos indicadores como lombrices o ciertas plantas, que permiten evaluar de manera real la toxicidad de los metales en los suelos agrícolas [2]. Además, no se han aplicado modelos de transporte ni se ha evaluado el impacto de los metales pesados en la microbiota del suelo, a pesar de que estudios internacionales demuestran que estos son capaces de alterar la diversidad bacteriana y afectar la fertilidad y la capacidad de recuperación del suelo [2].

La ausencia de métodos de especiación química, bioensayos de biodisponibilidad y estudios sobre microbiota constituye una limitación crítica. Estos vacíos restringen la comprensión integral del riesgo ambiental y alimentario, y evidencian la necesidad de incorporar enfoques complementarios que permitan caracterizar la movilidad, persistencia y efectos biológicos de los metales en suelos agrícolas peruanos, especialmente en contextos de agroexportación intensiva.

CONCLUSIONES

La revisión realizada permite evidenciar que el estudio de metales pesados en suelos agrícolas peruanos se encuentra en una etapa inicial, con avances puntuales pero aún fragmentados. Si bien existe una creciente preocupación por la inocuidad alimentaria y el impacto ambiental, las investigaciones son limitadas, lo que impide una comprensión integral del riesgo ambiental y a la salud humana. Esta situación muestra cierto distanciamiento entre la generación de conocimiento y las exigencias de sostenibilidad, trazabilidad y gestión del riesgo en contextos de agroexportación.

Los hallazgos evidencian también la necesidad de una investigación más integrada, que no se limite a la cuantificación de contaminantes, sino que incorpore herramientas complementarias como la especiación química, los bioensayos de biodisponibilidad, los modelos de transporte y el análisis de la microbiota edáfica. Estas metodologías permitirían entender con mayor precisión la movilidad, persistencia y efectos biológicos de los metales, potenciando la capacidad de respuesta técnica y normativa por parte del estado peruano.

Asimismo, se pudo constatar que se requiere fomentar la transparencia ambiental en todos los niveles del sistema productivo, incluyendo tanto a pequeños productores como a grandes empresas agroexportadoras. La articulación entre academia, estado y sector privado será clave para consolidar una base científica fuerte que oriente decisiones estratégicas, promueva la innovación metodológica y garantice la seguridad alimentaria ante la creciente preocupación ecológica y por la salud del consumidor.

REFERENCIAS

- [1] M. Custodio, R. Peñaloza, S. Ochoa, and W. Cuadrado, “Human risk associated with the ingestion of artichokes grown in soils irrigated with water contaminated by potentially toxic elements, Junín, Peru,” *Saudi Journal of Biological Sciences*, vol. 28, no. 10, pp. 5952–5962, 2021, doi: 10.1016/j.sjbs.2021.06.054.
- [2] M. A. Anaya-Raymundo, A. Ruíz-Janje, L. P. Blas-Montenegro, R. M. Angulo-Valdivia, and D. P. De La Cruz Cámaco, “Origen, distribución y dinámica de metales pesados en suelos agrícolas: implicaciones edáficas y ambientales,” *Manglar*, vol. 22, no. 2, pp. 287–301, 2025, doi: 10.57188/manglar.2025.030.
- [3] N. S. Bedoya-Perales, A. Neimaier, D. Maus, E. Escobedo-Pacheco, K. Eduardo, and G. Pumi, “Patterns of accumulation and baseline values for metals in agricultural soils from a copper mining region in southern Peru,” *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, vol. 20, p. 100896, 2023, doi: 10.1016/j.enmm.2023.100896.
- [4] Y. Wan, J. Liu, Z. Zhuang, Q. Wang, and H. Li, “Heavy metals in agricultural soils: Sources, influencing factors, and remediation strategies,” *Toxics*, vol. 12, no. 1, p. 63, 2024, doi: 10.3390/toxics12010063.
- [5] E. Coayla Coayla, V. L. Romero Carrion, and Y. T. Bedón Soria, “Regulación económica e impacto ambiental de la gran minería cuprífera en el desarrollo de Perú,” *EST*, vol. 24, no. 74, pp. 1–24, 2024, doi: 10.22136/est20242032.
- [6] E. Coayla and Y. Bedón, “The agro exports of organic native products and environmental security in Peru,” *EJES*, vol. 7, no. 1, pp. 125–139, 2021, doi: 10.26417/175umi47d.
- [7] M. Oliva, K. Rubio, M. Epquin, G. Marlo, and S. Leiva, “Cadmium uptake in native cacao trees in agricultural lands of Bagua, Peru,” *Agronomy*, vol. 10, no. 10, p. 1551, 2020, doi: 10.3390/agronomy10101551.
- [8] D. Mondal, R. Periche, B. Tineo, L. A. Bermejo, M. M. Rahman, A. B. Siddique, M. A. Rahman, J. L. Solis, and G. J. F. Cruz, “Arsenic in Peruvian rice cultivated in the major

- rice growing region of Tumbes river basin," *Chemosphere*, vol. 241, p. 125070, 2020, doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.125070.
- [9] M. Custodio, R. Peñaloza, E. Orellana, M. Aguilar-Cáceres, and E. Maldonado-Oré, "Heavy metals and arsenic in soil and cereal grains and potential human risk in the central region of Peru," *Journal of Ecological Engineering*, vol. 22, no. 1, pp. 206–220, 2021, doi: 10.12911/22998993/129255.
- [10] N. S. Bedoya-Perales, E. Escobedo-Pacheco, D. Maus, A. Neimaier, and G. Pumi, "Dataset of metals and metalloids in food crops and soils sampled across the mining region of Moquegua in Peru," *Scientific Data*, vol. 10, no. 1, p. 483, 2023, doi: 10.1038/s41597-023-02363-0.
- [11] M. J. Ismodes Chavez and L. M. Tisnado Alejo, "Relación de la concentración de metales pesados en suelos agrícolas sobre la fitotoxicidad en hortalizas, distrito de Saylla, Cusco," Tesis de Maestría, Universidad Continental, Cusco, Perú, 2025, disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.12394/16679>. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/20.500.12394/16679>
- [12] N. Florida Rofner, "Cadmium in soil and cacao beans of Peruvian and South American origin," *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, vol. 74, no. 2, pp. 9499–9515, 2021, doi: 10.15446/rfnam.v74n2.91107.
- [13] C. E. Vargas Fernández, A. A. Minaya Lizárraga, and M. V. M. Málaga Cornejo, "The toxic legacy of artisanal and informal mining: XRF and GIS analysis of soil contamination by Hg, Pb and As in the Secocha annex, Camaná, Peru," *RICA*, vol. 40, pp. 387–402, 2024, doi: 10.20937/RICA.55079.
- [14] Y. Y. Fabián Céspedes, "Evaluación de la concentración de cadmio y plomo en el suelo y tubérculos, de un cultivo convencional y orgánico de papa (*Solanum tuberosum*), en el distrito de Panao, provincia de Pachitea – Huánuco, 2022," Huánuco, Perú, 2023, disponible en: <http://repositorio.udh.edu.pe/20.500.14257/4028>. [Online]. Available: <http://repositorio.udh.edu.pe/20.500.14257/4028>
- [15] M. Oliva, D. E. Camas, X. J. Valqui, J. B. Meléndez, and S. Leiva, "Quantitative determination of cadmium (Cd) in soil-plant system in potato cropping (*Solanum tuberosum* var. huayro)," *Advances in Agriculture*, vol. 2019, pp. 1–4, 2019, doi: 10.1155/2019/9862543.
- [16] M. R. Quispe-Zuniga, F. Santos, D. Callo-Concha, and K. Greve, "Impact of heavy metals on community farming activities in the Central Peruvian Andes," *Minerals*, vol. 9, no. 10, p. 647, 2019, doi: 10.3390/min9100647.
- [17] J. Rosales-Huamani, J. Breña-Ore, A. Landauro-Abanto, J. Arenas Ñiquin, L. Centeno-Rojas, A. Otiniano-Zavala, J. Andrade-Choque, and J. Medina-Collana, "Study to determine levels of cadmium in cocoa crops applied to inland areas of Peru: The case of the Campo Verde–Honoria–Tournavista Corridor," *Agronomy*, vol. 10, no. 10, p. 1576, 2020, article ID 1576, doi: 10.3390/agronomy10101576.
- [18] ——, "Determination of potentially toxic elements in quinoa crops located in the Huacaybamba–Huanuco–Peru Area," *International Journal of Membrane Science and Technology*, vol. 10, no. 2, pp. 206–219, 2023, doi: 10.15379/ijmst.v10i2.1181.
- [19] J. W. Cano, "Metales pesados y fertilidad de los suelos de la irrigación Canal N, Puno, Perú," *Manglar*, vol. 18, no. 4, pp. 419–426, 2021, doi: 10.17268/manglar.2021.054.

- [20] B. Luis-Alaya, M. Toro, R. Calsina, K. Ogata-Gutiérrez, A. Gil-Polo, E. Ormeño-Orrillo, and D. Zúñiga-Dávila, “Evaluation of the presence of arbuscular mycorrhizae and cadmium content in the plants and soils of cocoa plantations in San Martin, Peru,” *Diversity*, vol. 15, no. 2, p. 246, 2023, doi: 10.3390/d15020246.

AUTORES



Ing. Químico Samuel Pacheco Marchán es Maestro en Ingeniería Ambiental y Doctorando en Ciencias Ambientales. Se desempeña como docente en la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Tumbes (UNTUMBES). Su labor investigativa se centra en la evaluación de problemas ambientales asociados a la contaminación por metales pesados en el río Tumbes.



Dr. Luis Bermejo Requena es Ingeniero Agrónomo, Maestro en Ciencias con mención en Desarrollo Rural y Doctor en Ciencias Agrarias. Es Profesor Principal y desarrolla investigaciones en el ámbito de las Ciencias Agrarias. Asimismo, es creador de la Línea de Investigación en Servicios Ecosistémicos de la Universidad Nacional de Tumbes.



Ing. Nicole Vergara-Alfaro es Ingeniera Industrial Pesquera, con estudios de Maestría en Ciencias con mención en Gestión Ambiental. Actualmente participa en la ejecución de proyectos de investigación en la Universidad Nacional de Tumbes, contribuyendo al desarrollo de estudios aplicados en el ámbito ambiental.



Ing. Cristhofer Villar Cruz es Ingeniero Industrial Pesquero y Maestrante en Ciencias con mención en Gestión Ambiental. Cuenta con experiencia en trabajo de laboratorio y colabora en investigaciones científicas en las áreas de microbiología, biología molecular y procesos pesqueros en la Facultad de Ingeniería Pesquera y Ciencias del Mar (FIPCM) de la Universidad Nacional de Tumbes.



Dr. Alberto Ordinola Zapata es Ingeniero Pesquero, Maestro en Acuicultura y Gestión Ambiental y Doctor en Ciencias Ambientales. Se desempeña como Profesor Investigador en la FIPCM y dirige el Grupo de Investigación de Biodiversidad Acuática Tropical de la Universidad Nacional de Tumbes.