

Revisión sistemática de la eficacia de los líquenes como bioindicadores atmosféricos de metales pesados en el Perú

Systematic review of the efficacy of lichens as atmospheric bioindicators of heavy metals in Peru

César Benjamín Pérez Vargas^{1,a} , Meibilyn Brenda León Bravo^{1,a} ,
Anne Jhosselyn Panduro Navarro^{1,a} , Luis Eduardo Bravo Salazar^{1,a} ,
Jorge Antonio Romero Estacio^{2,b} 

Filiación institucional

¹ Centro de Estudios Ambientales (CESAM), Huánuco, Perú.

² Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), Huánuco, Perú.

Grado académico

^a Egresado del Programa Académico de Ingeniería Ambiental.

^b Maestro en Gestión Pública.

Recibido: 10-10-25

Aprobado: 12-12-25

Publicado: 07-01-26

RESUMEN

La contaminación atmosférica por metales pesados como plomo (Pb), cadmio (Cd), arsénico (As), cobre (Cu) y zinc (Zn) representa un riesgo significativo para la salud pública y el medioambiente. El objetivo de esta revisión fue comparar la eficacia de los líquenes como bioindicadores de la contaminación atmosférica en el Perú. Se recopilaron estudios científicos nacionales que reportaron concentraciones de metales pesados en líquenes, identificando las especies evaluadas y las técnicas analíticas empleadas. Los resultados de la revisión muestran que el líquen *Cladonia* acumuló 61.00 ppm de Pb, 99.34 ppm de Zn y 1.50 ppm de Cd, mientras que *Physcia erumpens* alcanzó 113.51 ppm de Cu. Las concentraciones de metales en varias especies superaron los límites de los estándares de calidad ambiental (ECA), lo que indica que los líquenes son eficaces para monitorear la contaminación en áreas urbanas e industriales. Se llegó a la conclusión de que los líquenes, especialmente *Cladonia* y *Physcia erumpens*, demostraron ser herramientas eficaces, accesibles y económicas para el monitoreo de la calidad del aire, brindando una alternativa viable en zonas con recursos limitados.

Palabras clave: líquenes, bioindicadores, metales pesados, bioacumulación, contaminación atmosférica, monitoreo ambiental.

ABSTRACT

Atmospheric contamination by heavy metals such as lead (Pb), cadmium (Cd), arsenic (As), copper (Cu) and zinc (Zn) represents a significant risk to public health and the environment. The objective of this review was to compare the efficacy of lichens as bioindicators of atmospheric contamination in Peru. National scientific studies that reported concentrations of heavy metals in lichens were compiled, identifying the evaluated species and the analytical techniques employed. The results of the review show that the lichen *Cladonia* accumulated 61.00 ppm of Pb, 99.34 ppm of Zn and 1.50 ppm of Cd, while *Physcia erumpens* reached 113.51 ppm of Cu. The concentrations of metals in several species exceeded the limits of environmental quality standards (ECA), which indicates that lichens are effective for monitoring contamination in urban and industrial areas. It was concluded that lichens, especially *Cladonia* and *Physcia erumpens*, proved to be effective, accessible and economical tools for air quality monitoring, providing a viable alternative in areas with limited resources.

Keywords: lichens, bioindicators, heavy metals, bioaccumulation, atmospheric contamination, environmental monitoring.

Citar como: Pérez-Vargas, C., León-Bravo, B., Panduro-Navarro, A., Bravo-Salazar, E., y Romero-Estacio, J. (2026). Revisión sistemática de la eficacia de los líquenes como bioindicadores atmosféricos de metales pesados en el Perú. *Revista Peruana de Ingeniería, Arquitectura y Medio Ambiente*, 3(1), 10-22. <https://doi.org/10.37711/repiama.2026.3.1.2>

Introducción

La contaminación atmosférica por metales pesados, como Pb, Cd, As, Hg y Ni, persiste como un riesgo crítico para la salud pública y los ecosistemas debido a su toxicidad, persistencia y capacidad de bioacumulación (Calderón-Guevara et al., 2023). La fracción de metales ligada al material particulado inhalable puede penetrar profundamente en el tracto respiratorio y acumularse en órganos, elevando el riesgo de enfermedades respiratorias y cardiovasculares, así como de cáncer, con mayor vulnerabilidad en niños y adultos mayores (Khoshakhlagh et al., 2024; Liang et al., 2025). Las principales fuentes incluyen la minería y la metalurgia, la combustión de combustibles fósiles, el tránsito vehicular y la resuspensión de polvo urbano e industrial, con impactos también en ambientes interiores, donde las exposiciones pueden ser prolongadas (Okoro et al., 2025). En países andinos con intensa actividad extractiva y crecimiento urbano acelerado, la vigilancia de metales en el aire es prioritaria, pero los sistemas instrumentales suelen ser costosos y de cobertura limitada, por lo que se requieren estrategias complementarias de monitoreo ambiental, como, por ejemplo, los líquenes como bioindicadores (Dahmardeh Behrooz et al., 2025).

En ecotoxicología, un bioindicador refleja cambios cualitativos del estado ambiental (presencia o efecto), mientras que un biomonitor permite cuantificar los contaminantes acumulados en el organismo a lo largo del tiempo (Szczeplaniak & Biziuk, 2003). Los líquenes presentan simbiosis entre un micobionte y un fotobionte, carecen de cutícula y vasos, captan nutrientes directamente de la atmósfera y retienen partículas mediante deposición seca y húmeda, y por intercambio iónico, rasgos que los hacen idóneos para evaluar metales en el aire a diferentes escalas (Nash, 2008). Entre las principales ventajas de los líquenes destacan su bajo costo de muestreo, la integración temporal de la exposición a contaminantes y su amplia distribución geográfica. No obstante, presentan limitaciones asociadas a la variabilidad interespecífica, a los efectos microclimáticos y a la necesidad de normalizar los protocolos (selección de especies y sustratos, preparación de muestras y técnicas analíticas) para garantizar la comparabilidad entre estudios (Conti & Cecchetti, 2001).

A nivel internacional, se ha comprobado que los líquenes pueden detectar la presencia de metales como Pb, Cd, Zn, Cu y As en zonas urbanas e industriales. Estos organismos permiten identificar áreas con alta contaminación cerca de fuentes emisoras y también registrar mejoras cuando se aplican controles ambientales (Conti & Cecchetti, 2001). En Latinoamérica, los estudios realizados en grandes ciudades e industrias han mostrado un aumento de estos metales debido al tráfico y a las actividades metalúrgicas, utilizando la composición de los líquenes y la cantidad de metales que acumulan para evaluar la contaminación. Las investigaciones con líquenes trasplantados han demostrado que responden rápidamente a cambios en la contaminación del aire y en la dirección del viento (Lijteroff et al., 2009). En el Perú, diversos estudios han demostrado la utilidad de los líquenes como bioindicadores de la contaminación atmosférica. Doria et al. (2024) evaluaron la bioacumulación de metales pesados en líquenes de la comunidad nativa Atahualpa, en Satipo, y evidenciaron concentraciones elevadas de Pb, Zn y Cu asociadas principalmente al tránsito vehicular y a la actividad industrial cercana. Los resultados mostraron que los líquenes responden de manera sensible a las variaciones en la calidad del aire, lo que confirma su eficacia para identificar zonas con mayor carga contaminante y su potencial para el monitoreo ambiental.

Aunque el país cuenta con estándares de calidad ambiental (ECA) para el aire, persiste una importante brecha respecto a qué especies de líquenes son las más eficientes y hasta qué magnitud pueden acumular metales pesados. En el Perú, la investigación sobre líquenes como bioindicadores ha aumentado en las últimas décadas, especialmente en regiones donde la minería, la industria y el tráfico vehicular generan altos niveles de contaminación atmosférica (Yaulilahua-Huacho et al., 2024). Diversos estudios en departamentos como Junín, Puno, Cusco, Arequipa y Lima han demostrado que los líquenes no solo reflejan la calidad del aire mediante la acumulación de metales como Pb, Cu, Zn y Cd, sino que también contribuyen a la descontaminación al retener y fijar estos elementos en sus estructuras (Soto Sinche y Altuna Ríos, 2023). La doble función de estos líquenes como indicadores y como filtros biológicos se convierte en una herramienta valiosa para el monitoreo ambiental y la gestión de la calidad del aire.

A pesar del incremento de estudios locales sobre bioindicadores en departamentos como Junín, Lima y Cusco, persiste una brecha crítica en la literatura nacional: la falta de una comparación sistemática que determine la jerarquía de la eficacia entre especies para metales específicos. Actualmente, no existe un consenso técnico sobre qué especie (por ejemplo, *Cladonia* vs. *Physcia*) es superior para detectar contaminantes particulares bajo las condiciones climáticas del Perú, lo que dificulta la estandarización de protocolos de vigilancia ambiental.

Por lo tanto, el objetivo general de este estudio fue comparar la eficacia de los líquenes como bioindicadores de la contaminación atmosférica para la detección y acumulación de metales pesados en diversas regiones del Perú. Los objetivos específicos fueron los siguientes: evaluar la capacidad de acumulación de metales pesados en distintas especies de líquenes, comparar las concentraciones de metales en los líquenes con los ECA peruanos y con la normativa internacional y determinar qué especie presenta mayor eficacia como bioindicador. A partir de esta información, se elaboró una síntesis comparativa que permita orientar futuras líneas de investigación y, fundamentalmente, proveer una metodología de monitoreo atmosférico de bajo costo con alto valor social para la protección de la salud pública.

Materiales y métodos

Área de estudio

El presente trabajo corresponde a una revisión bibliográfica de tipo descriptivo y comparativo, basada en la recopilación y el análisis de estudios científicos realizados en el Perú sobre la bioacumulación de metales pesados en líquenes utilizados como bioindicadores de contaminación atmosférica. No se delimitó un área geográfica específica, ya que el propósito principal fue integrar y analizar la información existente sobre líquenes utilizados como bioindicadores de metales pesados presentes en la atmósfera.

Fuente de datos

Etapa 1. Aplicación de criterios de inclusión y exclusión

Respecto a los criterios de inclusión, se tomaron en cuenta únicamente las investigaciones realizadas en el territorio peruano que presenten resultados cuantitativos sobre la concentración de metales pesados en líquenes, que identifiquen de manera precisa las especies analizadas y que describan los métodos empleados en la determinación de dichos metales. También se consideraron estudios como las tesis siempre que cumplieran las mismas condiciones mencionadas y fueran elaboradas por profesionales que optasen por el título, la maestría o el doctorado en carreras afines a la Biología, la Ingeniería Forestal, la Ingeniería Ambiental o la Ingeniería Agrónoma (Aguirre et al., 2022).

Para la presente revisión, se llevó a cabo una búsqueda exhaustiva de la literatura científica publicada entre 2017 y 2025. Tras la aplicación de los criterios de inclusión y exclusión, se seleccionó un total de diez estudios definitivos identificados en la Tabla 1 que cumplieron con el rigor técnico y la disponibilidad de datos comparativos necesarios para el análisis comparativo.

Etapa 2. Búsqueda especializada de fuentes de investigación

Se realizó la búsqueda bibliográfica utilizando combinaciones de palabras clave en español e inglés, tales como "líquenes", "bioindicadores", "metales pesados", "plomo", "cobre", "cadmio", "mercurio" y "Perú". Se aplicaron operadores booleanos (AND, OR) para optimizar la localización de los estudios pertinentes.

Etapa 3. Fuentes de información

Se seleccionaron las fuentes de información a consultar, entre las cuales se incluyeron bases de datos científicas reconocidas como Scopus, Web of Science, SciELO, Renati y Google Scholar, así como repositorios institucionales de universidades peruanas y documentos técnicos emitidos por organismos ambientales nacionales, como el Ministerio del Ambiente (MINAM). Toda esta combinación de fuentes permitió reunir tanto publicaciones científicas arbitradas como informes técnicos y tesis con valor académico y aplicabilidad nacional.

Etapa 4. Selección y registro

Se revisaron los títulos, resúmenes y textos completos de las publicaciones preseleccionadas para determinar su pertinencia, y se eligieron aquellas que cumplieran con los criterios establecidos. De cada documento se extrajo información sobre el título, el autor, el año, la región, las coordenadas, el tipo de ambiente, la especie de líquen, el metal analizado, la técnica instrumental empleada, la unidad de medida y los valores de concentración reportados. Todos los registros se incorporaron en una matriz general de datos elaborada en Microsoft Excel, que sirvió de base para el análisis posterior.

Procesamiento de la información

Estandarización de unidades de medida

Se efectuó la estandarización de los datos, homogeneizando las unidades de concentración a partes por millón (ppm) de peso seco, a fin de garantizar la coherencia entre los diferentes estudios. También se revisó la consistencia de los valores y se eliminaron los registros duplicados o inconsistentes.

Análisis documental

Se procedió a la clasificación de los datos según la especie de líquen, el metal evaluado y la región geográfica del estudio. Esta organización permitió identificar patrones generales, tendencias y diferencias en la capacidad de bioacumulación de los líquenes frente a distintos metales pesados y a diferentes condiciones ambientales. También se verificó el tipo de cobertura espacial y temporal de la información recopilada, con el propósito de representar adecuadamente la diversidad de contextos investigados en el país.

Análisis estadístico de los datos

El análisis de la información se realizó de manera descriptiva y comparativa, con base en los datos recopilados en las fuentes seleccionadas. En esta etapa se examinaron las concentraciones reportadas de metales pesados en las distintas especies de líquenes, considerando las variaciones según la región, el tipo de ambiente y el metal evaluado. La información se organizó para visualizar las diferencias entre especies y la distribución general de los valores reportados en el país.

Luego, se elaboró una síntesis interpretativa orientada a identificar qué especies de líquenes presentan mayor capacidad de bioacumulación y, por lo tanto, mayor eficacia como bioindicadores atmosféricos. Los resultados obtenidos se compararon con los ECA, a fin de contextualizar los niveles detectados y evaluar la relevancia ambiental de los valores reportados. Para este proceso, se emplearon el *software* Microsoft Excel y el programa estadístico SPSS para un análisis estadístico descriptivo, lo que permitió el cálculo de medidas de tendencia central y dispersión de las concentraciones de metales.

Resultados

Los valores de concentración de metales pesados presentados en esta sección corresponden a datos recopilados de estudios previamente publicados, los cuales fueron estandarizados y analizados de forma comparativa para identificar patrones de bioacumulación en diferentes especies de líquenes.

La Tabla 1 presenta los estudios clave que conforman la base bibliográfica de esta revisión, todos enfocados en el uso de líquenes para detectar la presencia de metales pesados en diversas regiones del Perú.

Capacidad de acumulación de metales pesados en distintas especies de líquenes, comparada con los ECA peruanos y con las normativas internacionales del Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME) y de Sudáfrica

La Figura 1a) muestra que, respecto al As, *Cladonia* acumuló la mayor cantidad, con 6.20 ppm, seguida por *Usnea*, con 5.10 ppm, ambas por debajo del límite ECA de 50 ppm. En la Figura 1b), para el Cd, *Cladonia* acumuló 1.50 ppm, superando el límite de ECA de 1.4 ppm, mientras que otras especies, como *Parmotrema*

Tabla 1

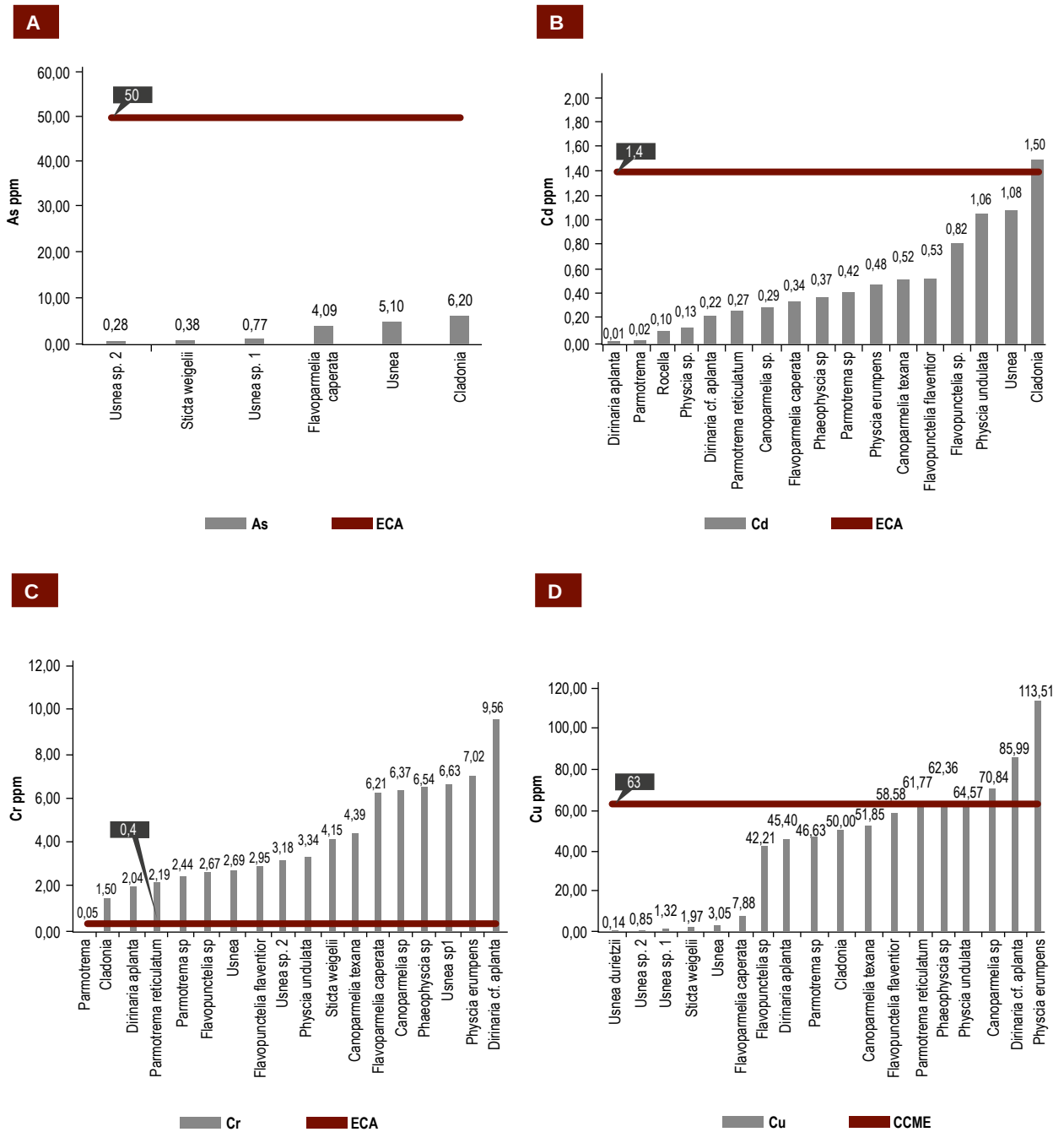
Estudios sobre los líquenes como bioindicadores de metales pesados en el Perú

N.º	Título del estudio	Autor	Especies de líquenes
1	Trace element biomonitoring in the Peruvian andes metropolitan region using <i>Flavoparmelia caperata</i> lichen.	Huamán de la Cruz et al., 2018	<i>Flavoparmelia caperata</i>
2	Los líquenes como bioindicadores de presencia de metales pesados en ecosistemas de montaña: experiencia en la cordillera Blanca, Ancash-Perú.	Arroyo Sánchez, 2022	<i>Usnea</i> sp. 1, <i>Usnea</i> sp. 2 y <i>Sticta weigelii</i>
3	Bioacumulación de metales pesados en tejidos de vegetación acuática y terrestre evaluados en áreas donde existen pasivos ambientales mineros en el Perú.	Cahuana y Aduvire, 2019	<i>Usnea</i> y <i>Cladonia</i>
4	Bioacumulación de metales pesados: plomo, cadmio y cromo en plantas medicinales recolectadas en zonas cercanas a alto tráfico vehicular en la ciudad del Cusco.	Callo, 2022	<i>Usnea</i> , <i>Parmotrema</i> y <i>Flavoparmelia caperata</i>
5	Calidad del aire mediante la <i>Liquenobiota saxícolas</i> en la zona arqueológica de Teatino-Reserva Nacional Lomas de Lachay, Huacho- Lima-Perú, 2017.	Ferry López, 2018	<i>Xanthoria parietina</i> , <i>Hypogymnia physodes</i> y <i>Usnea</i> sp.
6	Uso de líquenes como bioindicadores de contaminación atmosférica en el pasivo ambiental minero Santo Toribio, Áncash, Perú.	Valdivia y Ramírez, 2018	<i>Usnea durietzii</i>
7	Análisis de la contaminación del aire por metales pesados (plomo y cadmio) utilizando el líquen <i>Physcia</i> sp. en el distrito de Tingo María-Leoncio Prado-Huánuco-2022.	Peña, 2023	<i>Physcia</i> sp.
8	Líquenes como bioindicadores de la calidad de aire en el distrito de San Miguel, Lima Perú.	Cari Acosta, 2022	<i>Roccella</i>
9	Evaluación de la calidad del aire mediante el índice de pureza ambiental y el análisis de metales pesados en el líquen <i>Xanthoparmelia</i> sp. (Vain.) Hale en la ciudad de Puno.	Villamar Valdivia, 2018	<i>Xanthoparmelia</i> sp.
10	Biodiversidad, índice de pureza atmosférica (IPA) y bioacumulación de metales (Pb, Cr, Cd, Cu, Ni, Zn) en los líquenes presentes en las Lomas de Amoquinto, Huacaluna (Moquegua) y Tacahuay (Tacna), 2020 y 2021.	Salinas Delgado, 2021	<i>Canoparmelia</i> sp., <i>Dirinaria cf. applanata</i> , <i>Dirinaria applanata</i> , <i>Flavopunctelia flaventior</i> , <i>Flavopunctelia</i> sp., <i>Parmotrema reticulatum</i> , <i>Parmotrema</i> sp., <i>Phaeophyscia</i> sp., <i>Physcia erumpens</i> y <i>Physcia undulata</i>

y *Dirinaria applanata*, mostraron concentraciones mucho menores. En la Figura 1c), en cuanto al Cr, *Dirinaria cf. applanata* mostró la mayor acumulación, con 9.56 ppm, seguida por *Physcia erumpens*, con 7.02 ppm, ambas por encima del ECA de 0.4 ppm; mientras que *Parmotrema* y *Cladonia* presentaron concentraciones significativamente más bajas. En la Figura 1d), para el Cu, *Physcia erumpens* tuvo la mayor acumulación, con 113.51 ppm, seguida por *Dirinaria cf. applanata* y *Canoparmelia* sp., con concentraciones superiores a 60 ppm, superando los estándares de calidad de CCME, siendo 63 ppm.

Figura 1

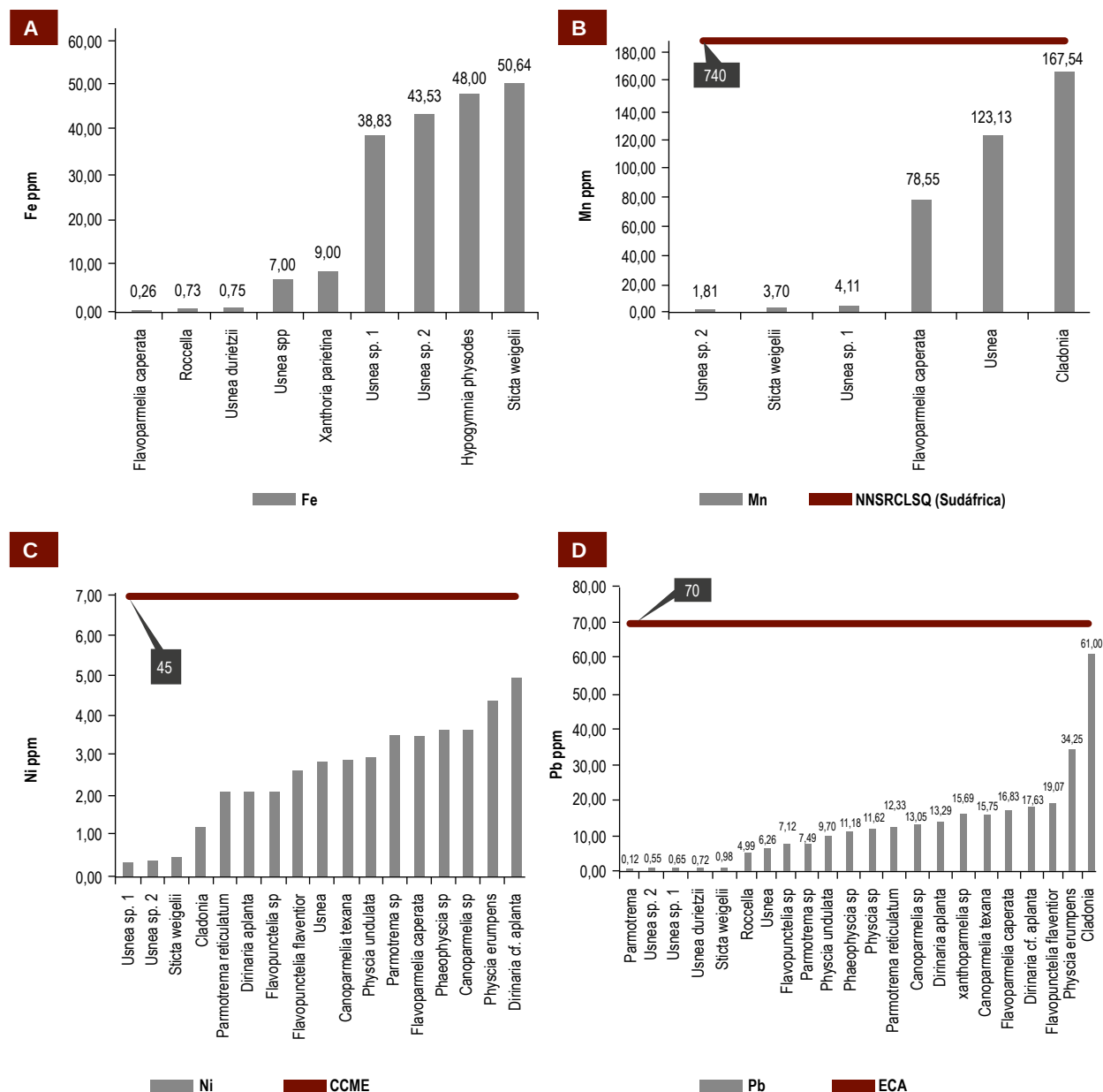
Concentración de metales pesados (As, Cd, Cr) en líquenes, comparados con los ECA; solo el Cu fue comparado con el CCME



En la Figura 2a), *Sticta weigelii* acumuló la mayor cantidad de Fe, con 50.64 ppm, seguida por *Usnea sp. 2* y *Hypogymnia physodes*. En la Figura 2b), el Mn de *Cladonia* tuvo la mayor acumulación, con 167.54 ppm, significativamente más alta que en otras especies, como *Flavoparmelia caperata* (78.55 ppm) y *Usnea* (123.13 ppm), y todas por debajo del estándar de Sudáfrica (740 ppm). En la Figura 2c), para Ni, *Dirinaria cf. applanata* acumuló 4.94 ppm, siendo la especie con mayor concentración, seguida por *Physcia erumpens* y *Canoparmelia sp.*, con concentraciones menores, todo ello por debajo del CCME de 45 ppm. En la Figura 2d), el Pb de *Cladonia* presentó la mayor acumulación, con 61.00 ppm, que estuvo cerca del límite ECA de 70 ppm, mientras que otras especies acumularon Pb en concentraciones menores.

Figura 2

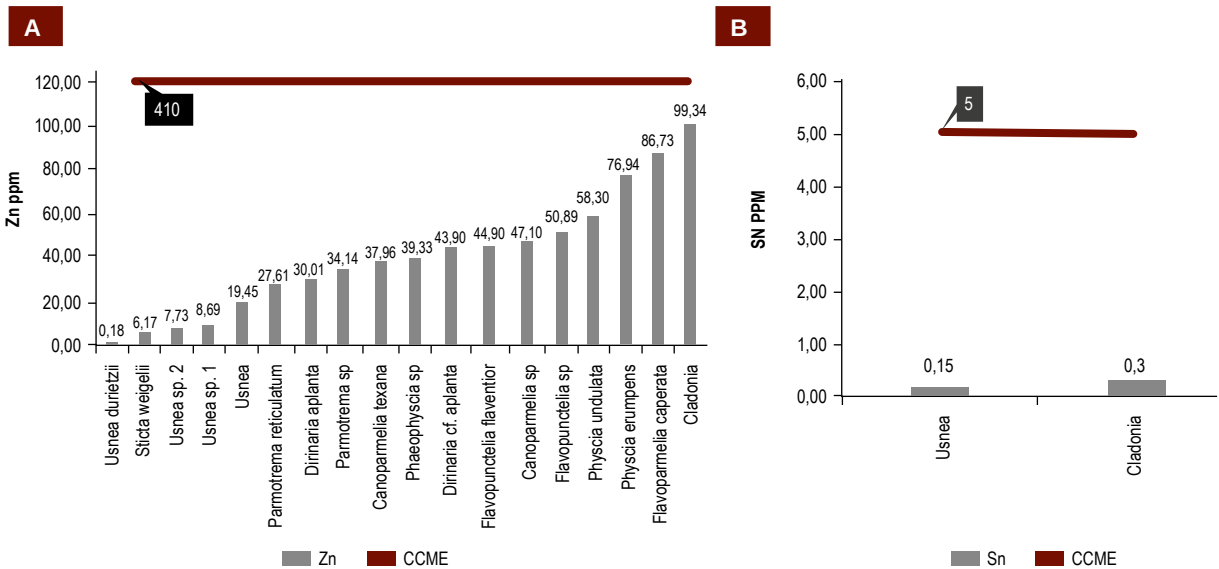
Concentración de metales pesados de Fe (a), Mn (b), Ni (c) y Pb (d) en líquenes; Pb fue comparado con los ECA; Ni fue comparado con la normativa del CCME; Mn fue comparado con la norma de Sudáfrica (National Norms and Standards for the Remediation of Contaminated Land and Soil Quality) (GN R.331 de 2014), y el Fe no se llegó a comparar con ningún estándar de calidad, porque la viabilidad del hierro en el suelo es tan grande que dificulta establecer un valor genérico estándar



En la Figura 3a), para el Zn, *Cladonia* acumuló 99.34 ppm, seguida por *Flavoparmelia caperata*, con 86.73 ppm, destacándose respecto a otras especies con concentraciones más bajas; todas las especies de líquenes se encuentran por debajo del CCME de 410 ppm. Y, en la Figura 3b), para el Sn, *Cladonia* acumuló 0.30 ppm y *Usnea* 0.15 ppm; ambos valores fueron bajos en comparación con el CCME, teniendo el valor de 5 ppm.

Figura 3

Concentración de metales pesados de Zn (a) y Sn (b) en líquenes, comparados con la normativa del CCME

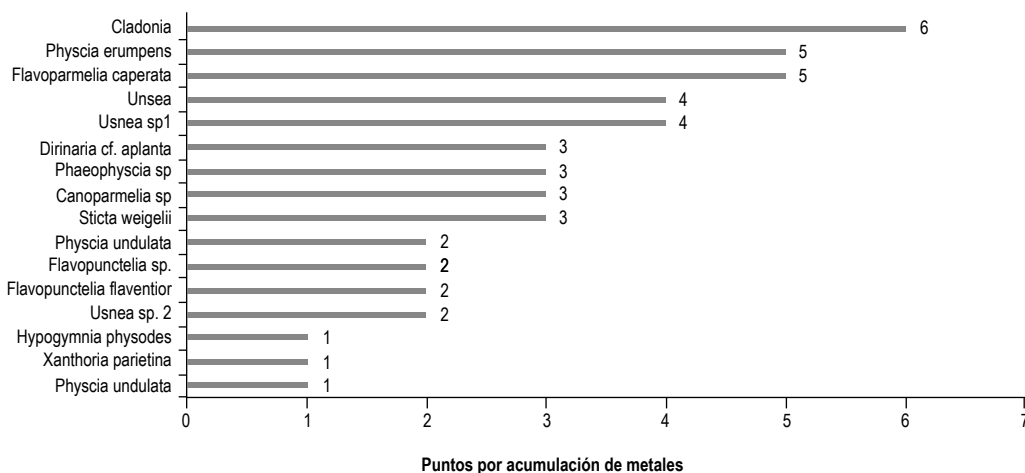


Análisis de la identificación de la eficiencia de líquen con mayor captura de metales pesados

La Figura 4 presenta una comparación de las especies de líquenes según su capacidad relativa de bioacumulación de metales pesados, calculada a partir de los valores reportados en los estudios analizados, donde la *Cladonia* lidera con 6 puntos, seguida por *Physcia erumpens* y *Flavoparmelia caperata*, ambas con 5 puntos. *Usnea* y *Usnea sp. 1* tienen 4 puntos. Las especies con 3 puntos incluyen *Dirinaria cf. applanata*, *Phaeophyscia sp.*, *Canoparmelia sp.* y *Sticta weigeli*. Las especies con menor acumulación de metales obtienen 1 o 2 puntos, como *Physcia undulata* y *Flavopunctelia sp.*

Figura 4

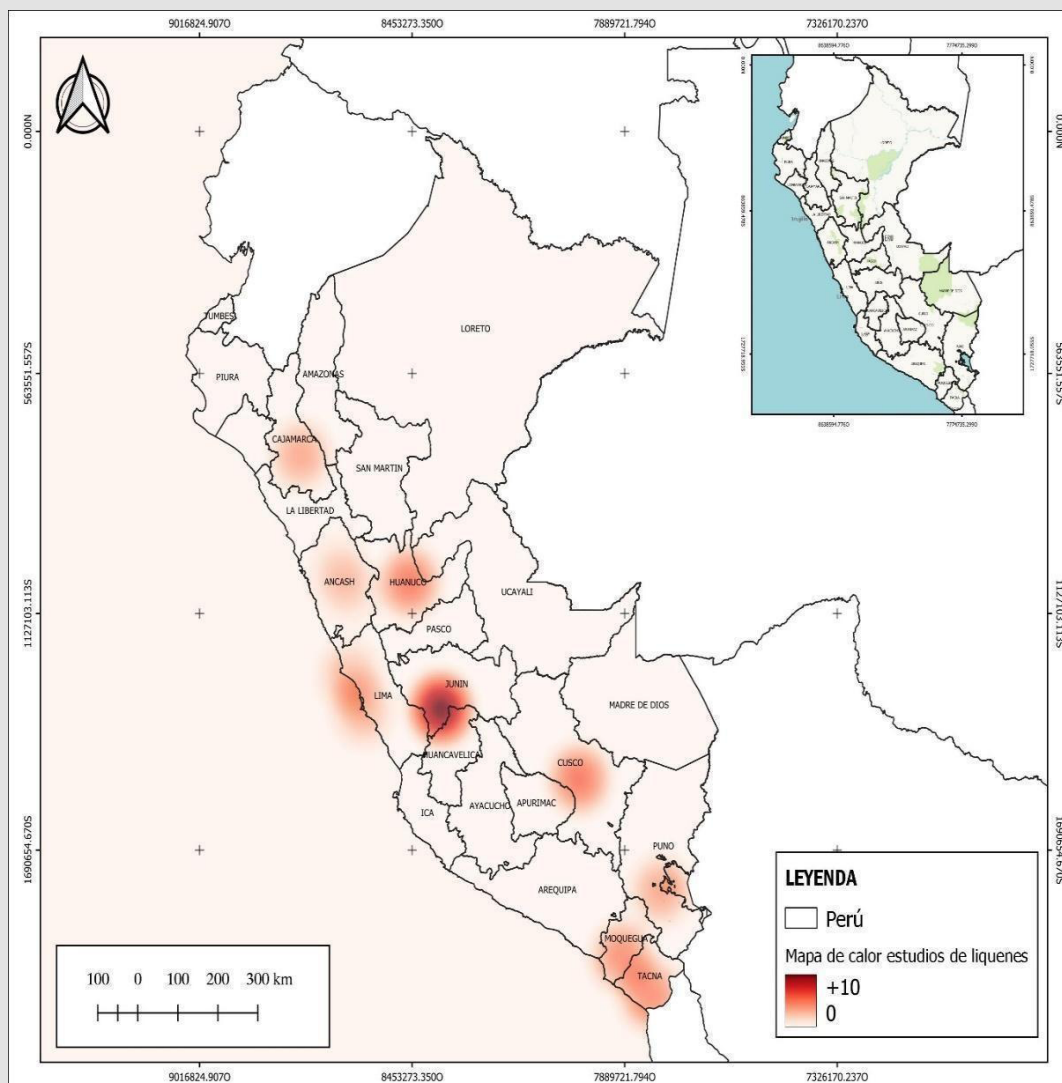
Puntos obtenidos por especies de líquenes según su capacidad para acumular metales pesados



La Figura 5 muestra un mapa de calor que indica las áreas con mayor número de estudios sobre líquenes como bioindicadores de la contaminación atmosférica en el Perú. Las regiones con mayor número de investigaciones se encuentran principalmente en Junín, con más de diez estudios, seguido de Lima, Cusco y Tacna, con menos de diez estudios. Esto podría deberse a que las actividad industrial y minera generan altos niveles de contaminación en los departamentos mencionados.

Figura 5

Mapa de calor de las áreas con mayor incidencia de estudios sobre bioindicadores en líquenes



Discusiones

La revisión de los estudios analizados permitió identificar qué especie de líquenes presenta la mayor capacidad de bioacumulación de determinados metales: la morfología de *Cladonia*, que favorece la retención de partículas por deposición seca, es la responsable de que este organismo acumule más Pb y Zn que otras especies. Este resultado coincide con investigaciones anteriores realizadas en la zona andina. No obstante, al comparar los niveles de Cu que Huamán de la Cruz et al. (2018) encontraron en *Physcia erumpens* con los registrados en este análisis, se observa una contradicción importante, pues los primeros fueron notablemente más bajos que los

segundos. Esta discrepancia indica que la eficacia no solo depende de la especie, sino también de la cercanía a fuentes emisoras específicas y de las variables microclimáticas locales, que no siempre se detallan en los textos nacionales. Ello dificulta estandarizar estos organismos como sensores universales. De forma similar, Arroyo Sánchez (2022) encontró que *Usnea* se destacó por la acumulación de metales como el As en ecosistemas de montaña, con valores de 6 a 9 ppm, lo que muestra una relación con los resultados de esta revisión. Estas coincidencias pueden explicarse por la capacidad de los líquenes para acumular metales pesados a través de la deposición seca y húmeda, como señalan Conti & Cecchetti (2001), quienes explican que los líquenes, por su biología y forma de nutrición directa del aire, tienden a acumular contaminantes de forma eficiente en zonas con alta contaminación atmosférica, lo que es respaldado por Doria et al. (2024), quienes identificaron altas concentraciones de metales pesados en líquenes cercanos a actividades industriales en Satipo. Esta capacidad de los líquenes para servir como bioindicadores específicos de metales en el ambiente urbano e industrial refuerza su potencial para monitorear la calidad del aire en áreas contaminadas, especialmente donde el monitoreo instrumental resulta costoso o inaccesible.

De los diez metales evaluados, Cd, Cr y Cu fueron los únicos que superaron las normas ambientales. Según Arroyo Sánchez (2022), la concentración de Cd en los suelos alcanzó un máximo de 0.98 ppm, por debajo del límite de 1.4 ppm del ECA para suelos, lo cual es similar a los resultados obtenidos. Ello indica que los líquenes pueden acumular metales a niveles superiores a los encontrados en los suelos. En Cu, alcanzó una concentración de 4.105 ppm, que excede el rango de 3-14 ppm observado en suelos de países como Dinamarca y Polonia; esto evidencia la capacidad de los líquenes para acumular cobre a concentraciones superiores a los valores típicos de los suelos. Con Pb, alcanzaron 3.995 ppm, muy por debajo del límite de 70 ppm del ECA, pero *Cladonia* acumuló más Pb, lo que continúa indicando una considerable acumulación de este metal en los líquenes. Conti & Cecchetti (2001) explican que los líquenes tienen una alta capacidad para acumular contaminantes del aire debido a su estructura porosa y su exposición directa a la atmósfera, lo que les permite captar metales pesados con mayor eficiencia que los suelos. Según Szczepaniak & Biziuk (2003), los líquenes son útiles como bioindicadores debido a su capacidad para acumular metales atmosféricos mediante deposición húmeda y seca, lo que los hace especialmente efectivos en áreas urbanas e industriales, donde los niveles de metales pesados son más altos en el aire que en el suelo.

En la investigación de Arroyo Sánchez (2022), se encontraron concentraciones de hasta 11.210 ppm de manganeso y 15.792 ppm de zinc en líquenes de áreas urbanas con alta actividad industrial, lo que refuerza la capacidad de *Usnea* para acumular metales como Mn y Zn en ambientes contaminados. Por otro lado, Huamán de la Cruz et al. (2018) reportaron concentraciones de 9.6 ppm de cobre en líquenes de la región andina, que son menores a nuestros resultados. Esta especie se destaca en ambientes industriales, donde el Cu es uno de los metales más comunes. Dicha capacidad de acumulación de estos líquenes puede atribuirse a sus características morfológicas y fisiológicas. Según Conti & Cecchetti (2001), la acumulación de metales en líquenes depende en gran medida de las condiciones ambientales locales, como la proximidad a fuentes de emisión y la variabilidad climática, factores que pueden explicar las diferencias en las concentraciones de metales observadas en diversas regiones del Perú.

Los resultados obtenidos en este estudio tienen importantes implicancias para el monitoreo ambiental y la gestión de la calidad del aire en Perú. La identificación de líquenes como *Cladonia*, *Physcia erumpens*, *Flavoparmelia caperata* y *Usnea* como bioindicadores eficaces de la acumulación de metales pesados ofrece una alternativa accesible y de bajo costo frente a los métodos tradicionales de monitoreo, especialmente en zonas rurales o de difícil acceso. Esta capacidad de los líquenes para acumular metales pesados permite que se utilicen no solo como indicadores de contaminación, sino también como herramientas de monitoreo ambiental continuo. Esta función es crucial en áreas donde los recursos para implementar sistemas de monitoreo convencionales son limitados. El hallazgo de concentraciones elevadas de metales como Pb, Cu y Cd en varias especies subraya la necesidad urgente de fortalecer la gestión de la contaminación en el país. Al comparar las concentraciones de metales con los estándares internacionales, como los ECA y otros de Canadá, Estados Unidos y Sudáfrica, se observa que varios de los metales evaluados superan los límites establecidos, lo que resalta la importancia de incorporar líquenes en programas de monitoreo ambiental a nivel nacional. Conti & Cecchetti (2001) destacaron

que los líquenes tienen un gran potencial para monitorear la contaminación atmosférica debido a su capacidad de acumular metales pesados, especialmente en áreas urbanas e industriales. En dicho contexto, los resultados de este estudio no solo amplían el conocimiento sobre el comportamiento de los líquenes frente a la contaminación atmosférica, sino que también proponen una vía factible y eficaz para la vigilancia ambiental, contribuyendo a mejorar la protección de la salud pública y el medioambiente.

Una de las principales limitaciones de este estudio fue la escasez de investigaciones sobre la bioacumulación de metales pesados en líquenes, especialmente en varias regiones del Perú. La mayoría de los estudios se concentran en áreas específicas, como Lima, Junín y Cusco, lo que limita la cobertura geográfica y no permite una evaluación completa del potencial de los líquenes como bioindicadores a nivel nacional. También muchos de los estudios existentes no detallan lo suficiente las condiciones ambientales y los métodos de muestreo, lo cual dificulta la comparación directa de los resultados. Para futuros estudios, es crucial ampliar la investigación a otras regiones del Perú, en particular a las más afectadas por la actividad minera y el tráfico vehicular. Sería beneficioso estandarizar los métodos de análisis y muestreo, lo que permitiría una mejor comparación entre estudios y una mayor precisión en los resultados.

El hecho de que especies como *Dirinaria cf. applanata* hayan sobrepasado las restricciones de los ECA para el cromo y el cadmio no debe verse únicamente como un hallazgo cuantitativo, sino también como una señal de peligro para la salud ambiental. En contraste con los suelos, que tienen la capacidad de almacenar metales geogénicos, el estudio demuestra que lo acumulado en los líquenes proviene mayoritariamente de fuentes atmosféricas de origen humano. Así se confirma su papel como centinelas del aire en áreas urbanas peruanas donde no se realiza vigilancia instrumental.

Conclusiones

Se concluye que en el Perú las especies de líquenes presentan una jerarquía distinta en términos de eficacia bioindicadora. *Cladonia* es el organismo más eficaz para el seguimiento multielemental (Pb, Zn, Cd y As), mientras que *Phycia erumpens* es especialmente eficaz para identificar Cu. Dichos resultados confirman que estos organismos pueden ser empleados como una red de supervisión medioambiental económica, lo cual responde a la escasa cobertura de los sistemas instrumentales tradicionales en el país y a la necesidad de opciones técnicas.

Los resultados resaltan el potencial de los líquenes como herramientas accesibles y económicas para monitorear la calidad del aire en regiones con recursos limitados para el uso de equipos tradicionales de medición. Especies como *Cladonia* y *Phycia erumpens* pueden utilizarse en programas nacionales de monitoreo ambiental para detectar la contaminación por metales pesados. Estos hallazgos contribuyen a la toma de decisiones en la gestión ambiental y la protección de la salud pública, ayudando a identificar áreas con mayor carga contaminante y a implementar políticas que promuevan un aire más limpio en zonas afectadas por actividades industriales y mineras.

En el caso del hierro (Fe), no se realizó una comparación directa con estándares ambientales debido a que su concentración natural presenta una alta viabilidad geológica y edáfica, lo que dificulta establecer valores de referencia universales para su interpretación en estudios de bioacumulación atmosférica.

En términos prácticos, esta revisión sugiere incorporar los líquenes a los programas de monitoreo ambiental a nivel nacional, especialmente en áreas de influencia industrial y minera de los Andes peruanos. Para disminuir las discrepancias observadas entre los diferentes estudios y facilitar la creación de una base de datos nacional de bioindicadores confiable y comparable, se aconseja estandarizar los protocolos de limpieza de muestras y los periodos de exposición en futuras investigaciones.

Agradecimiento

Agradecemos a nuestros colegas y colaboradores por su valiosa ayuda en la recopilación de datos, la revisión del trabajo y los comentarios, que enriquecieron este artículo científico.

Referencias

- Aguirre, M., Arellano, A., & Velásquez, M. (2022, 18-22 de julio). Efficacy of lichens as bioindicators of atmospheric quality: A systematic review of the literature between the years 2011 and 2021 [conferencia]. *Education, Research and Leadership in Post-pandemic Engineering: Resilient, Inclusive and Sustainable Actions*, Boca Ratón, Estados Unidos. <https://doi.org/10.18687/LACCEI2022.1.1.213>
- Arroyo Sánchez, J. A. (2022). *Los líquenes como bioindicadores de presencia de metales pesados en ecosistemas de montaña: experiencia en la cordillera Blanca, Áncash-Perú* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Agraria La Molina]. Repositorio Institucional Universidad Nacional Agraria La Molina. <https://repositorio.lamolina.edu.pe/items/7793ed39-489d-48a9-9d91-122acb9afe05>
- Cahuana, L., y Aduvire, O. (2019). Bioacumulación de metales pesados en tejidos de vegetación acuática y terrestre evaluados en áreas donde existen pasivos ambientales mineros en el Perú. *Revista de Medio Ambiente Minero y Minería*, 4(2), 19-36. http://www.scielo.org.bo/pdf/mamym/v4n2/v4n2_a02.pdf
- Calderón-Guevara, M. N., Carpio-Rivera, N. Y., y Galarza-Mora, W. G. (2023). Metales pesados Cd, Pb y Hg: una problemática de salud pública en el contexto de las relaciones internacionales e importancia de la academia en su mitigación. *MQR Investigar*, 7(3), 2545-2578. <https://doi.org/10.56048/MQR20225.7.3.2023.2545-2578>
- Callo, Y. (2022). *Bioacumulación de metales pesados: plomo, cadmio y cromo en plantas medicinales recolectadas en zonas cercanas a alto tráfico vehicular en la ciudad del Cusco* [Tesis doctoral, Universidad Nacional del Altiplano]. <https://www.proquest.com/openview/dc7031413c8f5a5b9b7478ed92f0012a1?pq-origsite=gscholar&cbl=2026366&diss=y>
- Cari Acosta, D. A. (2022). *Líquenes como bioindicadores de la calidad de aire en el distrito de San Miguel, Lima, Perú* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Federico Villarreal]. Repositorio Institucional UNFV. <https://repositorio.unfv.edu.pe/items/6601b3c1-c981-4684-99acd0cec6e2dded>
- Conti, M. E., & Cecchetti, G. (2001). Biological monitoring: Lichens as bioindicators of air pollution assessment — a review. *Environmental Pollution*, 114(3), 471-492. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(00\)00224-4](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(00)00224-4)
- Dahmardeh Behrooz, R., Gkaras, S. K., & Kaskaoutis, D. G. (2025). Atmospheric heavy metals and human health. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 45, 100607. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2025.100607>
- Doria, R., Yauri, M., y Susanibar-Sandoval, D. (2024). Uso de líquenes como bioindicadores de contaminación atmosférica en la comunidad nativa Atahualpa, Satipo (Perú). *Yotantsipanko*, 4(2), 11-22. <https://doi.org/10.54288/yotantsipanko.v4i2.44>
- Ferry López, G. N. (2018). *Calidad del aire mediante la Liquenobiota saxícolas en la zona arqueológica de Teatino-Reserva Nacional Lomas de Lachay, Huacho-Lima-Perú, 2017* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de la Amazonía Peruana]. Repositorio Institucional UNAP. <https://repositorio.unapiquitos.edu.pe/items/f248b28f-72e8-4881-90f4-8d0075a82d39>
- Huamán de la Cruz, A. R., Huamán de la Cruz, J. K., Álvarez Tolentino, D., & Gioda, A. (2018). Trace element biomonitoring in the Peruvian andes metropolitan region using *Flavoparmelia caperata* lichen. *Chemosphere*, 210, 849-858. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.07.013>
- Khoshakhlagh, A. H., Ghobakhloo, S., Peijnenburg, W. J. G. M., Gruszecka-Kosowska, A., & Cicchella, D. (2024). To breathe or not to breathe: Inhalational exposure to heavy metals and related health risk. *Science of The Total Environment*, 932, 172556. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172556>
- Liang, N., Li, Z., Sun, J., Fu, N., Zhong, G., Lin, X., Mao, K., Zhang, P., Chang, Z., Yang, D., Du, W., Shen, G., & Pan, B. (2025). A systematic review on heavy metals in indoor air: Occurrence, spatial variation, and health risk. *Building and Environment*, 269, 112357. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.112357>
- Lijteroff, R., Lima, L., y Prieri, B. (2009). Uso de líquenes como bioindicadores de contaminación atmosférica en la ciudad de San Luis, Argentina. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 25(2), 111-120. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992009000200006
- Nash, T. H. (Ed.). (2008). *Lichen biology* (2.ª ed.). Cambridge University Press & Assessment.
- Okoro, H. K., Orosun, M. M., Agboola, A. F., Emenike, E. C., Nanduri, S., Kedia, N., Kariem, M., Priya, A., & Rab, S. O. (2025). Health risk assessments of heavy metals in dust samples collected from classrooms in Ilorin, Nigeria and its impact on public health. *Heliyon*, 11(4), e42769. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e42769>
- Peña, J. C. (2023). *Análisis de la contaminación del aire por metales pesados (plomo y cadmio) utilizando el líquen *Physcia* sp. en el distrito de Tingo María-Leoncio Prado-Huánuco-2022* [Tesis de licenciatura, Universidad de Huánuco]. Repositorio Institucional UDH. <https://repositorio.udh.edu.pe/handle/20.500.14257/4535>
- Salinas Delgado, A. A. (2021). *Biodiversidad, índice de pureza atmosférica (IPA) y bioacumulación de metales (Pb, Cr, Cd, Cu, Ni, Zn) en los líquenes presentes en las lomas de Amoquinto, Huacaluna (Moquegua) y Tacahuay (Tacna), 2020 y 2021* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Moquegua]. Repositorio Institucional UNAM. <https://repositorio.unam.edu.pe/items/ba9f1e10-586d-4217-b0a9-13800e6b5d2e>
- Soto Sinche, F., y Altuna Ríos, M. O. (2023). *Evaluación de la presencia de metales pesados (plomo, cadmio) en el aire empleando el líquen *Everniastrum* sp. como bioindicador en la ciudad de Huaycán, distrito de Ate, Lima, Perú, 2022* [Tesis de grado, Universidad Peruana Unión].

- Szczepaniak, K., & Biziuk, M. (2003). Aspects of the biomonitoring studies using mosses and lichens as indicators of metal pollution. *Environmental Research*, 93(3), 221-230. [https://doi.org/10.1016/S0013-9351\(03\)00141-5](https://doi.org/10.1016/S0013-9351(03)00141-5)
- Valdivia, D., y Ramírez, Á. (2018). Uso de líquenes como bioindicadores de contaminación atmosférica en el pasivo ambiental minero Santo Toribio, Áncash, Perú. *The Biologist*, 16(1), 77-95. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9397897>
- Villamar Valdivia, O. G. (2018). *Evaluación de la calidad del aire mediante el índice de pureza ambiental y el análisis de metales pesados en el líquen Xanthoparmelia sp. (Vain.) Hale en la ciudad de Puno* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional del Altiplano]. Repositorio Institucional Universidad Nacional del Altiplano. <https://repositorio.unap.edu.pe/server/api/core/bitstreams/4f662a51-6852-4482-aecd-851cfe647698/content>
- Yaulilahua-Huacho, R., Sumarriva-Bustinza, L. A., Gave-Chagua, J. L., Huere-Peña, J. L., y García-Ticllacuri, R. (2024). Líquenes epifitos como bioindicadores de contaminación del aire en la ciudad de Lircay, Perú. *Revista Alfa*, 8(22), 244-255. <https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v8i22.262>

Contribución de los autores

Los autores desarrollaron la investigación en su totalidad.

Fuentes de financiamiento

El financiamiento fue realizado con recursos propios de los autores.

Conflictos de interés

Los autores declaran no tener conflictos de interés.

Correspondencia:

Jorge Antonio Romero Estacio
E-mail: jromero@senamhi.gob.pe