

PRESENCIA DE METALES PESADOS Y LA CONTAMINACIÓN EN AGUAS DE LATINOAMÉRICA: RIESGOS PARA LA SALUD Y EL MEDIO AMBIENTE



**Rodolfo Rafael Sánchez Valencia
Nelly Aurora Perez Diaz
Manuel Emilio Reátegui Inga
Santiago Alberto Casas Luna**

**PRESENCIA DE METALES PESADOS
Y LA CONTAMINACIÓN EN AGUAS
DE LATINOAMÉRICA:
RIESGOS PARA LA SALUD Y EL
MEDIO AMBIENTE**



Rodolfo Rafael Sánchez Valencia
Nelly Aurora Perez Diaz
Manuel Emilio Reátegui Inga
Santiago Alberto Casas Luna

Conselho Editorial

Prof. Dr. Adilson Tadeu Basquerote Silva - UNIDAVI
Prof. Dr. Astor João Schönell Júnior - IFFAR
Prof. Dr. Alan Ricardo Costa - UFRR
Prof. Dr. Allan Diêgo Rodrigues Figueiredo - UESPI
Profa. Dra. Andréia Bulaty - UNESPAR
Profa. Dra. Carla da Conceição de Lima - UFVJM
Prof. Dr. Camilo Darsie de Souza - UNISC
Profa. Dra. Clarice Caldeira Leite - UFRGS
Profa. Dra. Cecilia Decarli - UFRGS
Prof. Dr. Carlos Adriano Martins - UNICID
Prof. Dr. Christian Dennys Monteiro de Oliveira - UFCE
Profa. Dra. Dayse Marinho Martins - UFMA
Prof. Dr. Deivid Alex dos Santos - UEL
Prof. Dr. Dioni Paulo Pastorio - UFRGS
Prof. Dr. Douglas Manoel Antonio de Abreu Pestana dos Santos - FASESP
Profa. Dra. Elane da Silva Barbosa - UERN
Profa. Dra. Elen Gomes Pereira - IFBA
Profa. Dra. Francielle Benini Agne Tybusch - UFN
Prof. Dr. Francisco Odécio Sales - IFCE
Prof. Dr. Francisco Ricardo Miranda Pinto - UFCAT
Prof. Dr. Gilvan Charles Cerqueira de Araújo - UCB
Prof. Dr. Ismar Inácio dos Santos Filho - UFAL
Prof. Dr. Leonardo Bigolin Jantsch - UFSM
Profa. Dra. Liziany Müller Medeiros - UFSM
Profa. Dra. Marcela Mary José da Silva - UFRB
Prof. Dr. Mateus Henrique Köhler - UFSM
Prof. Dr. Michel Canuto de Sena - UFMS
Profa. Dra. Mônica Aparecida Bortolotti - UNICENTRO
Prof. Nilton David Vilchez Galarza - UPLA
Prof. Dr. Olavo Barreto de Souza - UEPB
Prof. Dr. Rafael Nogueira Furtado - UFABC
Prof. Dr. Roberto Araújo da Silva Vasques Rabelo - UNISANTOS
Prof. Dr. Rodrigo Toledo - USCS
Prof. Dr. Rodolfo Rodrigues de Souza - UERJ
Prof. Dr. Sidnei Renato Silveira - UFSM
Prof. Dr. Thiago Ribeiro Rafagnin - UFOB
Prof. Dr. Tomás Raúl Gómez Hernández - UCLV

Editor Chefe: Ivania Folmer

Projeto gráfico e Diagramação: Gabriel Eldereti Machado

Imagem capa: www.canva.com

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

Presencia de metales pesados y la contaminación en
aguas de Latinoamérica [livro eletrônico] :
riesgos para la salud y el Medio ambiente /
Rodolfo Rafael Sánchez Valencia... [et al.].
-- Santa Maria, RS : Arco Editores, 2026.
PDF

Outros autores: Nelly Aurora Perez Diaz, Manuel
Emilio Reátegui Inga, Santiago Alberto Casas Luna.
Bibliografia.
ISBN 978-65-5417-636-1

1. Água - Poluição 2. América Latina - Aspectos
ambientais 3. Metais pesados - Aspectos ambientais
4. Poluição - Aspectos ambientais I. Sánchez
Valencia, Rodolfo Rafael. II. Perez Diaz, Nelly
Aurora. III. Reátegui Inga, Manuel Emilio.
IV. Casas Luna, Santiago Alberto.

26-329711.0

CDD-333.91

Índices para catálogo sistemático:

1. Água : Gestão ambiental : Recursos hídricos 333.91

Eliete Marques da Silva - Bibliotecária - CRB-8/9380

 **10.48209/978-65-5417-636-1**

*Este livro é o resultado de uma pesquisa científica em atividades de ciência e tecnologia.
O trabalho foi revisado por pares acadêmicos externo antes de ser publicado.*



CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	8
ÍNDICE DE FIGURAS.....	9
RESUMEN.....	10
ABSTRACT.....	11
INTRODUCCIÓN.....	12
CAPÍTULO I.....	14
METALES PESADOS: ASPECTOS GENERALES.....	14
1.1. Nociones esenciales de los metales pesados.....	15
1.1.1. <i>Características de los metales pesados</i>	16
1.1.2. <i>Clasificación de los metales pesados</i>	17
1.2. Fuentes y vías de exposición de los metales pesados.....	18
1.2.1. <i>Fuentes de los metales pesados</i>	20
1.2.2. <i>Vías de exposición de los metales pesados</i>	21
1.3. Principales metales pesados: propiedades y efectos tóxicos.....	22
1.3.1. <i>Cadmio (Cd)</i>	22
1.3.2. <i>Arsénico (As)</i>	23
1.3.3. <i>Mercurio (Hg)</i>	24
1.3.4. <i>Plomo (Pb)</i>	24
1.3.5. <i>Cromo (Cr)</i>	25
1.4. Metales pesados y contaminación ambiental.....	26
1.4.1. <i>Tipos de contaminación ambiental por metales pesados</i>	27
1.4.2. <i>Destino de los metales pesados en el ecosistema</i>	28
1.5. Regulaciones y normativas de los metales pesados.....	29
1.5.1. <i>Organismos reguladores de los metales pesados</i>	31
1.5.2. <i>Convenios internacionales sobre metales pesados</i>	31
CAPÍTULO II.....	34
CONTAMINACIÓN DEL AGUA EN AMÉRICA LATINA.....	34
2.1. Contaminación hídrica en América Latina.....	35
2.1.1. <i>Impacto de la contaminación del agua en Latinoamérica</i>	36
2.1.2. <i>Fuentes de contaminación del agua en Latinoamérica</i>	37
2.2. Principales tipos de contaminación hídrica en América Latina.....	38

2.2.1. Contaminación física.....	39
2.2.2. Contaminación química.....	40
2.2.3. Contaminación biológica.....	41
2.3. Riesgos asociados a la contaminación hídrica en América Latina	42
2.3.1. Salud humana.....	43
2.3.2. Medio ambiente.....	45
2.4. Agua regenerada en el desarrollo hídrico de América Latina.....	46
2.4.1. Tratamiento de aguas residuales en Latinoamérica.....	47
2.4.2. Inversión pública en el sector del agua en Latinoamérica.....	48
2.5. Rentabilidad del tratamiento de aguas residuales en América Latina	49
2.5.1. Análisis de costo-beneficio (ACB).....	49
2.5.2. Análisis de costo-efectividad (ACE).....	50
2.5.3. Análisis del costo del ciclo de vida (ACCV).....	51
CAPÍTULO III.....	53
ECOTOXICIDAD DE METALES PESADOS EN SISTEMAS HÍDRICOS DE AMÉRICA LATINA.....	53
3.1. Comportamiento de los metales pesados en sistemas hídricos.....	54
3.1.1. Transporte y movilidad.....	54
3.1.2. Especiación química y solubilidad.....	55
3.1.3. Adsorción y desorción.....	55
3.1.4. Precipitación y disolución.....	56
3.1.5. Bioacumulación.....	58
3.2. Riesgos ocasionados por metales pesados en sistemas hídricos.....	58
3.2.1. Ecosistema.....	59
3.2.2. Sanitario.....	60
3.3. Técnicas de detección de metales pesados en sistemas hídricos.....	61
3.3.1. Espectrometría de absorción atómica.....	61
3.3.2. Espectrometría de plasma de acoplamiento inductivo.....	62
3.3.3. Técnicas fotométricas.....	62
3.3.4. Técnicas electroquímicas.....	63
3.4. Métodos de tratamientos en la remoción de metales pesados en sistemas hídricos.....	64

3.4.1. <i>Técnicas convencionales</i>	64
3.4.2. <i>Técnicas no convencionales</i>	67
3.5. Casos de contaminación hídrica por metales pesados en América Latina.....	68
3.5.1. <i>Contaminación del río Rímac (Perú)</i>	69
3.5.2. <i>Contaminación del río Atrato (Colombia)</i>	70
3.5.3. <i>Contaminación del río Atoyac (México)</i>	71
CAPÍTULO IV.....	73
CONTAMINACIÓN DE SISTEMAS HÍDRICOS POR METALES PESADOS: UNA REVISIÓN EN CONTEXTOS LATINOAMERICANOS	73
4.1. Metodología.....	76
4.2. Resultados.....	77
4.3. Discusión.....	83
4.4. Conclusiones.....	87
CAPÍTULO V.....	88
RETOS Y OPORTUNIDADES PARA LA SOSTENIBILIDAD DE LOS RECURSOS HÍDRICOS: PERSPECTIVAS FUTURAS.....	88
5.1. Retos en la sostenibilidad hídrica.....	89
5.1.1. <i>Principales desafíos hídricos en Latinoamérica</i>	90
5.2. Oportunidades en la sostenibilidad hídrica.....	91
5.2.1. <i>Tecnologías de sostenibilidad del agua</i>	92
5.3. Importancia de la sostenibilidad en la gestión hídrica.....	94
5.3.1. <i>Recomendaciones para una gestión hídrica eficiente</i>	95
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	97
SOBRE LOS AUTORES.....	111

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Datos más importantes de los estudios examinados.....	79
----------------	---	----

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Contaminantes emergentes.....	74
Figura 2 Método PRISMA.....	77
Figura 3 Países con mayor producción científica.....	78
Figura 4 Tipo de metodología predominante en los estudios.....	79
Figura 5 Idiomas de publicación.....	81
Figura 6 Producción científica por año.....	82

RESUMEN

La intervención del ser humano es, en muchas ocasiones, responsable de la contaminación generalizada por metales pesados en el medio ambiente, una situación que impacta de manera negativa tanto en la salud humana como en los ecosistemas en general. La contaminación por metales pesados se debe principalmente a la industrialización, al cambio climático y a la urbanización. Teniendo en cuenta esta problemática, el objetivo del presente trabajo es conocer el estado actual de la literatura desarrollada sobre la contaminación de los sistemas hídricos por metales pesados en Latinoamérica. Por ello, se realizó una revisión sistemática de la literatura, cuyo proceso de búsqueda se basó en la metodología PRISMA; asimismo, se definieron criterios de inclusión que hicieron posible obtener y seleccionar los 25 estudios más relevantes relacionados con el tema. Entre los resultados obtenidos, destaca el año 2025 con el mayor número de publicaciones sobre la contaminación de sistemas hídricos por metales pesados en Latinoamérica; además, el idioma español fue el más utilizado, ya que representa el 56 % de la totalidad de artículos analizados. Latindex fue la base de datos con mayor número de estudios publicados en revistas indexadas (24 %), seguida de Scopus (12 %) y SciELO (12 %). Finalmente, se determinó que la presencia de estos metales en los ecosistemas naturales puede alterar y afectar significativamente la vida en el planeta, pues son capaces de persistir durante más tiempo y de bioacumularse, generando la degradación de la calidad y salubridad del agua. También se observó que gran parte de los estudios ejecutados en Latinoamérica reportaron altas concentraciones de Cu, Cr y Ni, las cuales son el resultado de diversas actividades antrópicas.

Palabras clave: sistemas hídricos, metales pesados, contaminación, Latinoamérica.

ABSTRACT

Human intervention is often responsible for widespread heavy metal pollution in the environment, a situation that has a negative impact on both human health and ecosystems in general. Heavy metal pollution is mainly due to industrialisation, climate change and urbanisation. Given this problem, the objective of this study is to ascertain the current state of the literature on heavy metal contamination of water systems in Latin America. To this end, a systematic review of the literature was conducted, using the PRISMA methodology as a basis for the search process. Inclusion criteria were also defined, which made it possible to obtain and select the 25 most relevant studies related to the topic. Among the results obtained, the year 2025 stands out as having the highest number of publications on heavy metal contamination of water systems in Latin America. Furthermore, Spanish was the most widely used language, accounting for 56% of all articles analysed. Latindex was the database with the highest number of studies published in indexed journals (24%), followed by Scopus (12%) and SciELO (12%). Finally, it was determined that the presence of these metals in natural ecosystems can significantly alter and affect life on the planet, as they are capable of persisting for longer periods of time and bioaccumulating, leading to the degradation of water quality and safety. It was also observed that a large proportion of the studies carried out in Latin America reported high concentrations of Cu, Cr and Ni, which are the result of various anthropogenic activities.

Keywords: Water systems, heavy metals, pollution, Latin America.

INTRODUCCIÓN

La gestión de los recursos hídricos y la contaminación por metales pesados representan desafíos críticos para América Latina debido a la creciente presión que existe sobre los cuerpos de agua y a los impactos ambientales asociados. En este escenario, la disponibilidad de agua limpia se ve afectada por actividades industriales, agrícolas y urbanas, mientras que la presencia de metales pesados como el mercurio, el arsénico y el plomo genera riesgos para la salud humana y los ecosistemas. Por tal motivo, resulta indispensable comprender las fuentes, las vías de exposición y los efectos tóxicos de estos elementos, así como los mecanismos de contaminación y control de los mismos.

En la región, la contaminación hídrica se manifiesta de distintas formas (física, química y biológica), cada una con impactos específicos sobre la salud pública y el ambiente. La escasez de agua segura y la degradación de cuerpos hídricos comprometen la producción agrícola, la industria y el bienestar de la población, incrementando la vulnerabilidad frente a fenómenos climáticos extremos. En este contexto, el tratamiento y regeneración de aguas residuales surge como una estrategia clave para garantizar la sostenibilidad y la seguridad hídrica. De la misma forma, la inversión pública y privada en infraestructura y tecnologías son factores clave para optimizar la eficiencia del recurso y reducir pérdidas significativas.

Por otra parte, la ecotoxicidad de los metales pesados en sistemas hídricos exige un análisis detallado de su comportamiento –incluyendo transporte, solubilidad, bioacumulación y adsorción–, cuya detección temprana y la correspondiente implementación de métodos de tratamiento, tanto convencionales como innovadores, son esenciales para prevenir impactos graves en el ecosistema y la salud humana. Al respecto, los casos de contaminación en ríos de Perú, Colombia y México evidencian la necesidad de una acción inmediata y de coordinación entre Gobiernos, sociedad civil y empresas.

En última instancia, los retos y oportunidades en la sostenibilidad hídrica requieren enfoques estratégicos, integrales y adaptativos que consideren aspectos ambientales, sociales y tecnológicos. La adopción de soluciones innovadoras, como tecnologías de eficiencia hídrica y digitalización, permite optimizar la gestión de los recursos y fortalecer la resiliencia frente a las sequías y la contaminación. Igualmente, la promoción de la conciencia ciudadana y la capacitación de los gestores contribuye a un uso más responsable y equitativo del agua.

CAPÍTULO I

METALES PESADOS: ASPECTOS GENERALES

Los metales pesados constituyen un grupo de elementos químicos con propiedades específicas que influyen de manera directa en los ecosistemas y en la salud humana, por lo que es fundamental comprender sus características y clasificación para abordar adecuadamente su impacto. Dichas propiedades determinan su comportamiento en el ambiente y su potencial toxicidad, mientras que la clasificación posibilita identificar aquellos metales que requieren una mayor atención en estudios y regulaciones. El análisis inicial de estos aspectos sienta las bases para comprender más integralmente su alcance y los riesgos que representan.

Adicionalmente, resulta indispensable identificar las fuentes y vías por las cuales los metales pesados entran en contacto con los seres vivos, pues esto condiciona la magnitud de la exposición y los posibles efectos adversos. Estas fuentes pueden ser naturales o derivar de actividades humanas, en tanto que las vías de ingreso incluyen la inhalación, ingestión y absorción cutánea. Por ello, conocer estos mecanismos es clave para diseñar estrategias eficaces de prevención y control que minimicen los riesgos asociados.

Por otra parte, resulta necesario enfocar la atención en los metales pesados más comunes y peligrosos, como cadmio, arsénico, mercurio, plomo y cromo, para examinar sus propiedades específicas y los daños que pueden ocasionar a la salud humana. Estos elementos tienden a acumularse en diferentes órganos del cuerpo, generando efectos tóxicos severos. Además, debido a que inciden en distintos tipos de contaminación ambiental, comprender su destino y comportamiento en los ecosistemas representa un aspecto medular para evaluar su impacto real.

En última instancia, dada la relevancia del problema, son las regulaciones y normativas las que juegan un rol fundamental en la mitigación de los riesgos derivados de los metales pesados, ya que establecen estándares para

su control y manejo. Por ende, es esencial conocer los organismos reguladores nacionales e internacionales, así como los convenios que promueven la cooperación global en este ámbito. Sin duda, tales marcos legales facilitan la protección efectiva de la salud pública y del medio ambiente frente a la contaminación por metales pesados.

1.1. Nociones esenciales de los metales pesados

Los metales pesados se reconocen como elementos persistentes en el ambiente, difíciles de detectar y con una elevada toxicidad para los seres humanos, incluso cuando se encuentran en cantidades mínimas. Por ello, resulta esencial divulgar sus propiedades y los efectos que generan, con el propósito de reducir la desinformación y establecer mecanismos que regulen su presencia en los ecosistemas. De hecho, gran parte de la población se encuentra expuesta de manera inadvertida a estos contaminantes, principalmente a través del consumo de agua, lo que incrementa el riesgo de exposición directa a estos compuestos nocivos (Ramírez et al., 2023).

Se considera como metal pesado a aquel elemento cuya densidad supera los 4 g/cm^3 y presenta un peso atómico mayor a 20, propiedades que le otorgan una notable capacidad de acumulación y persistencia en el medio ambiente. Además, puede hallarse en los suelos y ser absorbido por las plantas, y tener la capacidad de desplazarse hacia las capas más profundas del terreno, hasta alcanzar los acuíferos subterráneos. Esto, a la vez que amplía su distribución y potencial de contaminación, genera una conexión directa entre la contaminación del suelo y del agua (Soto-Benavente et al., 2020).

Adicionalmente, los metales pesados pueden definirse como elementos metálicos o semimetálicos con relevancia biológica, cuyo exceso resulta perjudicial debido a su tendencia a acumularse en organismos vivos, tanto animales como vegetales. Bajo este punto de vista, su impacto ambiental radica en su alta toxicidad y facilidad de difusión en los ecosistemas, destacando entre los más peligrosos el mercurio (Hg), plomo (Pb), cadmio (Cd), cromo (Cr), arsénico (As), cobre (Cu), manganeso (Mn), zinc (Zn), níquel (Ni) y plata (Ag), los

cuales son reconocidos por su persistencia y capacidad de generar alteraciones fisiológicas graves (Neira-Moscoso et al., 2021).

En suma, la presencia de metales pesados constituye una amenaza significativa para la salud pública y la integridad de los ecosistemas, ya que su acumulación se asocia con enfermedades crónicas como cáncer, y daños en órganos vitales como el hígado y los riñones. En este sentido, las principales fuentes de contaminación del suelo se relacionan con actividades industriales intensivas, entre las que destacan la minería y la extracción de petróleo, además del vertido de aguas residuales, lodos industriales y compost no tratados, factores que incrementan la probabilidad de contaminación en áreas urbanas y periurbanas frente a las zonas rurales o agrícolas (Mendoza-Escalona et al., 2021).

1.1.1. Características de los metales pesados

Los metales pesados destacan por poseer propiedades físicas, químicas y biológicas que determinan su comportamiento en los ecosistemas y su potencial de toxicidad. Estas características explican su persistencia en el ambiente y su capacidad de causar daños ecológicos y sanitarios; además, su estructura y composición influyen en su movilidad, biodisponibilidad y capacidad de acumulación en organismos vivos. Por lo tanto, resulta esencial comprender sus propiedades para evaluar su impacto ambiental y establecer estrategias de control y mitigación eficaces.

A. Propiedades físicas. Presentan una elevada densidad (mayor a 4-5 g/cm³) y peso atómico alto (superior a 20 u), lo que les confiere una estructura estable y persistente en el ambiente, característica que dificulta su degradación natural y favorece su acumulación en suelos y sedimentos. Adicionalmente, presentan altos puntos de fusión y buena conductividad térmica y eléctrica, factores que son capaces de incrementar su estabilidad físico-ambiental (Kou et al., 2024).

B. Propiedades químicas. Tienden a formar compuestos estables con oxígeno, azufre y carbono, lo que determina su movilidad y biodisponibilidad. Asimismo, variables ambientales como el pH, la humedad y el potencial redox

influyen en su comportamiento, mientras que los agentes quelantes pueden aumentar su desplazamiento en el suelo y el agua. También se ha comprobado que materiales como el óxido férrico reducen la movilidad de metales como el cadmio y el plomo (Zhang et al., 2023).

C. Propiedades biológicas. Tienen una gran toxicidad, incluso en concentraciones bajas, ya que alteran funciones celulares al unirse a proteínas y enzimas; además, poseen una alta capacidad de bioacumulación y biomagnificación que aumentan su concentración a lo largo de la cadena trófica. En este contexto, diversas investigaciones evidencian su presencia en especies acuáticas y alimentos, lo que refleja el riesgo que conlleva para la salud humana y ambiental (Almafrachi et al., 2025; Tejada-Purizaca et al., 2024).

Estas características de los metales pesados permiten comprender su alta persistencia y toxicidad dentro de los ecosistemas. En tal sentido, su densidad y estructura estable, junto con la formación de compuestos resistentes y su capacidad de bioacumulación, explican su presencia prolongada en el ambiente y su potencial de daño en organismos vivos. Por tal motivo, es preciso ahondar en su estudio para establecer medidas de prevención y mitigación efectivas frente a sus impactos (Kou et al., 2024; Tejada-Purizaca et al., 2024; Zhang et al., 2023).

1.1.2. Clasificación de los metales pesados

Según Kim et al. (2019), los metales pesados se distinguen según su función biológica y su nivel de toxicidad. Esto posibilita diferenciar entre aquellos indispensables para el metabolismo y los que carecen de una función específica en los organismos vivos. Algunos se necesitan en pequeñas cantidades, ya que intervienen en procesos fisiológicos vitales, mientras que otros, aun en concentraciones mínimas, pueden resultar altamente tóxicos y perjudiciales para la salud y el ambiente. Debido a estas propiedades, se les ha clasificado en dos grupos: esenciales y no esenciales.

A. Esenciales. Comprende aquellos metales que resultan indispensables para el desarrollo y funcionamiento de los seres vivos, por cuanto participan en procesos fisiológicos fundamentales y presentan baja toxicidad cuando se en-

cuentran en concentraciones adecuadas. Al respecto, elementos como el zinc, cobre, hierro, níquel y molibdeno son esenciales para el crecimiento de las plantas, la formación de tejidos animales y el mantenimiento del equilibrio ácido-base. También intervienen en la síntesis de enzimas, proteínas estructurales y hormonas, por lo que desempeñan un papel trascendental en funciones metabólicas vitales.

B. No esenciales. Incluye aquellos metales que no cumplen funciones biológicas conocidas y que, aun en bajas concentraciones, presentan una elevada toxicidad para los organismos vivos. Entre los más peligrosos destacan el cadmio, el plomo y el mercurio, reconocidos por su capacidad de acumularse en los tejidos, interferir con funciones enzimáticas y causar alteraciones neurológicas, renales y reproductivas. Por otra parte, debido a su persistencia y movilidad en el ambiente, estos metales son objeto de constante vigilancia en los programas de monitoreo ambiental a nivel mundial, ya que representan un riesgo para la salud humana y para los ecosistemas.

Esta clasificación facilita la comprensión de su papel dual en los ecosistemas, ya que pueden actuar como nutrientes necesarios y, a la vez, como agentes contaminantes peligrosos. En consecuencia, reconocer sus características, concentraciones y mecanismos de acción resulta fundamental para establecer estrategias de prevención y control a fin de reducir su impacto y garantizar la sostenibilidad ambiental, promoviendo así una gestión responsable que asegure la conservación de los recursos naturales y la salud de los seres vivos (Piwowarska et al., 2024).

1.2. Fuentes y vías de exposición de los metales pesados

Los metales pesados son persistentes en el organismo humano, con una vida media de excreción que puede durar décadas, lo que aumenta su potencial de acumulación y efectos tóxicos como carcinogenicidad, mutagenicidad y teratogenicidad, por lo que la contaminación con este tipo de metales representa una preocupación ambiental a nivel global. Igualmente, la producción y el consumo a gran escala, junto con la falta de regulaciones adecuadas,

favorecen la liberación de metales pesados al medio ambiente. Ello a través del riego con aguas residuales, eliminación de residuos sólidos, emisiones de gases vehiculares y deposición atmosférica (Anaya-Raymundo et al., 2025; Chang-Sheng et al., 2012).

Es conveniente señalar que los metales pesados se encuentran ampliamente distribuidos en el suelo, el agua, el aire y los alimentos, razón por la que ingresan al cuerpo humano por diversas rutas, incluyendo la inhalación de polvo, la ingestión directa de tierra y agua, el contacto dérmico con suelos y aguas contaminadas y el consumo de vegetales cultivados en terrenos afectados. En este contexto, es posible evidenciar la complejidad de la exposición y la necesidad de considerar distintos medios para evaluar los riesgos sanitarios, pues estas rutas pueden combinarse y aumentar la carga de exposición (Chang-Sheng et al., 2012).

Por otra parte, identificar la vía de exposición predominante resulta una tarea complicada debido a la falta de análisis que integren múltiples rutas, de manera que centrarse en un solo medio o vía podría no garantizar la protección de la población. Por consiguiente, resulta necesario evaluar la exposición agregada considerando las diferentes vías ambientales y sus interacciones. El objetivo es obtener estimaciones más precisas sobre los riesgos que los metales pesados representan para la salud humana, de manera que se pueda comprender mejor la contribución de cada ruta a la toxicidad general (Anaya-Raymundo et al., 2025; Chang-Sheng et al., 2012).

Estudios previos destacan la importancia de realizar evaluaciones de riesgos mediante un enfoque de múltiples vías para identificar aquellas rutas que puedan constituir una preocupación significativa. Esto permite orientar estrategias más efectivas y garantizar que las intervenciones se basen en un análisis integral de los medios y las formas de exposición, fortaleciendo con ello la seguridad ambiental y la salud pública, y contribuyendo a la formulación de políticas más informadas para reducir la exposición a metales pesados (Anaya-Raymundo et al., 2025).

1.2.1. Fuentes de los metales pesados

De acuerdo con Ramírez et al. (2023), los metales pesados representan un problema ambiental de gran relevancia, dado que se acumulan con facilidad en los ecosistemas. Por consiguiente, comprender el origen de estos elementos resulta fundamental para identificar las fuentes que más contribuyen a su dispersión, evaluar sus efectos sobre la salud y el ambiente, y establecer estrategias que permitan prevenir y controlar su impacto contaminante. En este sentido, las fuentes de contaminación pueden clasificarse en naturales y antropogénicas, aunque estas últimas son las que ocasionan mayor impacto debido a intensidad de las actividades humanas.

A. Naturales. Proviene principalmente de la corteza terrestre, y su liberación puede deberse tanto a procesos naturales como a la intervención humana, que modifica su composición. En particular, las erupciones volcánicas, la erosión de las rocas y la acción de las aguas termales constituyen las fuentes naturales más importantes de dispersión. Más aún, estos procesos geológicos facilitan la movilización de los metales hacia el suelo, el agua y el aire, por lo que aun cuando su origen sea natural, su presencia en exceso puede alterar los ecosistemas y afectar los organismos vivos.

B. Antropogénicas. Constituyen la principal causa de acumulación de metales pesados en el ambiente. Dentro de este escenario, destacan la agricultura (por el uso de fertilizantes e insecticidas), la ganadería y la minería, que intensifican la contaminación del suelo y del agua. Las industrias metalúrgica, química, electrónica y farmacéutica también intervienen en la liberación continua de estos compuestos. De igual forma, la descarga de aguas residuales, la quema de combustibles, el tabaquismo y prácticas culturales como la elaboración de objetos con barro vidriado incrementan su dispersión y persistencia en el entorno.

Asimismo, productos como tintes, pinturas, muebles, papeles, jabones, cosméticos y medicamentos contienen metales pesados, lo que evidencia la necesidad de generar conciencia sobre sus efectos y aplicar medidas que favorezcan un ambiente saludable y una mejor calidad de vida. Además, resulta

indispensable promover políticas ambientales más estrictas y fomentar el uso de tecnologías sostenibles que reduzcan la liberación de estos elementos al medio ambiente. Solo mediante la educación y la responsabilidad colectiva será posible mitigar los daños asociados a la contaminación por metales pesados (Ramírez et al., 2023).

1.2.2. Vías de exposición de los metales pesados

Conforme a Ramírez et al. (2023), los metales pesados constituyen un riesgo considerable para la salud, puesto que pueden ingresar al organismo por diferentes vías y acumularse en los tejidos causando efectos tóxicos. Por tal motivo, comprender las formas de exposición resulta decisivo para evaluar su impacto y establecer estrategias de prevención eficaces. Al respecto, son tres las principales vías de exposición: inhalatoria, dérmica y oral, cada una de ellas con distintos niveles de riesgo y consecuencias para el ser humano:

A. Inhalatoria. Catalogada como la más peligrosa, ya que permite el ingreso de los metales pesados directamente al organismo a través del sistema respiratorio. Sus efectos son rápidos y agresivos, provocando irritación, inflamación y daños en órganos vitales como pulmones e hígado. La exposición prolongada puede derivar en enfermedades respiratorias crónicas y trastornos sistémicos graves.

B. Dérmica. Presenta un riesgo relativamente bajo, pues no todos los metales pesados pueden ser absorbidos por la piel. Sin embargo, la exposición continua a suelos o aguas contaminadas puede generar irritaciones, reacciones alérgicas o lesiones en la piel. En ciertos casos, algunos compuestos metálicos pueden atravesar la barrera cutánea y acumularse en los tejidos, lo que incrementa el riesgo de toxicidad.

C. Oral. Considerada la más frecuente, dado que muchas plantas y organismos pequeños absorben metales pesados que luego son ingeridos por especies mayores, tales como el atún o el marlín, peces que acumulan altas concentraciones de mercurio orgánico (metilmercurio) en sus músculos, lo que representa un riesgo para el consumo humano. Estos contaminantes también se encuentran en fuentes de agua como ríos, pozos y lagos, por lo que

monitorear su presencia resulta esencial para garantizar la seguridad alimentaria y la salud pública.

Los metales pesados, una vez que ingresan al organismo, se combinan con proteínas de la sangre y se distribuyen hacia distintos órganos, principalmente el intestino delgado, el hígado, los riñones, el encéfalo y los huesos. Parte de estos metales se almacena en los tejidos, mientras que el resto se elimina a través de la orina y las heces. No obstante, la eficiencia de la filtración renal depende de la forma química en que los metales fueron ingeridos y de su afinidad con las células renales, lo que determina el grado de toxicidad y el tiempo que permanecen en el cuerpo (Ramírez et al., 2023).

1.3. Principales metales pesados: propiedades y efectos tóxicos

De acuerdo con Jomova et al. (2025), los metales pesados —debido a sus múltiples aplicaciones industriales, domésticas, agrícolas, médicas y tecnológicas— se han distribuido ampliamente en el medio ambiente, generando preocupación por sus efectos en la salud humana y ecológica. Su toxicidad depende de diversos factores, como la dosis, la vía de exposición, la especie química y las características del individuo expuesto. Por ello, el arsénico, el cadmio, el cromo, el plomo y el mercurio se consideran metales prioritarios por su impacto en la salud pública.

1.3.1. Cadmio (Cd)

Es un metal pesado blando, plateado y poco soluble en agua. Su número atómico es 48 y su estado de oxidación +2. Aunque es poco abundante en la corteza terrestre, se libera al medio ambiente tanto por procesos naturales como por actividades humanas, incluyendo la minería, la producción de baterías y el uso de fertilizantes. La exposición humana ocurre principalmente por inhalación e ingestión, acumulándose en hígado y riñones, donde puede inducir a una toxicidad crónica. Para contrarrestar esto, la metalotioneína, una proteína rica en cisteína, se une al Cd^{2+} y ayuda a reducir su toxicidad, aunque su acumulación prolonga la vida media del metal en el organismo.

La toxicidad del cadmio interfiere con la homeostasis de metales esenciales, provoca estrés oxidativo, apoptosis mitocondrial, disfunción de transportadores iónicos y alteraciones en la autofagia celular. Asimismo, la exposición prolongada está asociada con enfermedades respiratorias como la EPOC (enfermedad pulmonar obstructiva crónica), nefropatía, hipertensión, aterosclerosis y diversos tipos de cáncer, siendo el cáncer de pulmón el más frecuente. Esto se debe a que los mecanismos incluyen la regulación génica, el daño oxidativo al ADN, la inflamación y la acumulación de Cd-metalotioneína, que amplifica tanto la toxicidad como la persistencia del cadmio en el organismo.

1.3.2. Arsénico (As)

Es un metaloide que tiene el número atómico 33 y presenta varios estados de oxidación (+5, +3, 0, -3) y propiedades tanto de metales como de no metales. Aunque su presencia en la corteza terrestre es baja, es un elemento natural que se libera al medio ambiente por procesos naturales, como la erosión de rocas, y por actividades humanas, como la minería, la industria del vidrio, textiles, municiones y cosmética. La exposición humana al arsénico ocurre principalmente por ingestión, inhalación y absorción dérmica. Una vez en el organismo, se distribuye principalmente en hígado y riñones, donde se somete a biometilación para formar metabolitos como el Ácido Monometilarsónico (MMA) y el Ácido Dimetilarsínico (DMA), que facilitan su excreción, pero pueden inducir estrés oxidativo y daño celular.

La toxicidad del arsénico afecta múltiples sistemas biológicos, ya que interfiere con la homeostasis energética, induce la formación de especies reactivas de oxígeno (ROS), altera la señalización celular mediante vías como NF- κ B (principal impulsor de la inflamación y la inmunidad), MAPK (Proteínas Quinasa Activadas por Mitógenos) y Nrf2 (activa las defensas antioxidantes y la desintoxicación), y modifica histonas epigenéticamente. Además, la exposición crónica se asocia con cánceres de piel, pulmón y vejiga, trastornos cardiovasculares, neurotoxicidad y disfunción mitocondrial, siendo los mecanismos

principales la inhibición enzimática, el daño oxidativo al ADN, la inflamación y la alteración de la proliferación celular, lo que convierte al arsénico en un agente altamente tóxico.

1.3.3. Mercurio (Hg)

Es un metal pesado líquido a temperatura ambiente, de número atómico 80 y configuración electrónica [Xe] 4f¹⁴ 5d¹⁰ 6s². Se presenta en tres formas principales: elemental, inorgánica y orgánica; el compuesto orgánico más predominante es el metilmercurio, altamente neurotóxico. El mercurio se libera al medio ambiente por procesos geológicos y actividades humanas como la minería, combustión de carbón y producción industrial. La exposición humana a este metal ocurre por inhalación, ingestión y contacto dérmico, acumulándose en cerebro y riñones, donde induce al estrés oxidativo, disfunción mitocondrial, alteración de calcio y activación de vías inflamatorias y de señalización como Nrf2 y NF-κB.

La toxicidad del mercurio afecta múltiples sistemas: el metilmercurio atraviesa la barrera hematoencefálica y la placenta, causando neurotoxicidad, alteraciones en neurotransmisores como el glutamato, excitotoxicidad y apoptosis neuronal. Promueve neuroinflamación mediante la activación de microglía y astrocitos, y expresión de citoquinas proinflamatorias (IL-6, MCP-1). Adicionalmente, la exposición crónica se encuentra asociada con enfermedades neurodegenerativas, cardiopatías, nefropatías, alteraciones pulmonares y riesgo oncogénico mediante interacción con grupos tiol y selenol, peroxidación lipídica y alteraciones epigenéticas.

1.3.4. Plomo (Pb)

Es un metal pesado blando, gris azulado y de número atómico 82, con configuración electrónica [Xe] 4f¹⁴ 5d¹⁰ 6s² 6p², que se encuentra principalmente en la galena (PbS) y presenta estados de oxidación +2 y +4. Se libera al ambiente por la minería, la combustión de combustibles fósiles y el uso industrial de pinturas, baterías y tuberías, acumulándose en suelos, aguas y organis-

mos vivos. La exposición humana sucede por inhalación, ingestión y contacto dérmico, acumulándose en sangre, hígado, riñones y huesos, donde interfiere con enzimas y proteínas que contienen grupos tiol, generando estrés oxidativo, daño celular y alteraciones metabólicas.

La toxicidad del plomo afecta múltiples sistemas biológicos, especialmente el nervioso, renal, cardiovascular y reproductivo. Pb^{2+} sustituye a cationes esenciales como Ca^{2+} , Zn^{2+} y Fe^{2+} , alterando la neurotransmisión, la homeostasis del calcio y la función mitocondrial, lo que induce apoptosis neuronal y neuroinflamación. Además, su exposición crónica se asocia con deterioro cognitivo, nefropatía, hipertensión, infertilidad y trastornos del desarrollo fetal. Estos efectos se deben a la peroxidación lipídica, el daño al ADN y la activación de vías proinflamatorias, lo que convierte al plomo en un contaminante persistente y altamente tóxico para la salud humana.

1.3.5. Cromo (Cr)

Es un elemento metálico de transición de número atómico 24 y configuración electrónica $[Ar] 3d^5 4s^1$. Presenta varios estados de oxidación, siendo los más comunes el +3 (cromo trivalente) y el +6 (cromo hexavalente). Se encuentra naturalmente en rocas, suelos, agua y emisiones volcánicas, principalmente en su forma trivalente (Cr^{3+}). Sin embargo, actividades industriales como la metalurgia, el cromado y la soldadura pueden oxidar el cromo a su forma hexavalente (Cr^{6+}), más tóxica y móvil. La exposición humana ocurre por inhalación de aire contaminado, ingestión de agua o alimentos, o por contacto dérmico en ambientes industriales.

El cromo hexavalente (Cr^{6+}) es reconocido como un potente agente carcinógeno y mutágeno, cuya toxicidad se debe a su capacidad de generar especies reactivas de oxígeno (ROS), inducir estrés oxidativo y provocar daño al ADN. La exposición prolongada a este elemento puede tener efectos respiratorios (bronquitis, asma, cáncer pulmonar), gastrointestinales, dérmicos y cardiovasculares, además de alterar las funciones reproductivas y hepáticas. En contraste, el cromo trivalente (Cr^{3+}) en pequeñas cantidades es considerado un

micronutriente esencial para el metabolismo de la glucosa y los lípidos, aunque en concentraciones elevadas puede resultar tóxico.

Estos metales pesados constituyen tóxicos sistémicos reconocidos que, por su persistencia y capacidad de bioacumulación, están estrechamente asociados a una amplia gama de trastornos en la salud humana, incluyendo enfermedades cardiovasculares, neurológicas, renales, pulmonares, dérmicas y diversos tipos de cáncer. Asimismo, la exposición puede ocurrir tanto por fuentes naturales como por actividades industriales, agrícolas y domésticas, lo que representa un grave problema de salud pública y resalta la necesidad de estrategias efectivas de control ambiental (Jomova et al., 2025).

1.4. Metales pesados y contaminación ambiental

La contaminación ambiental por metales pesados constituye un problema global debido a sus efectos adversos sobre los ecosistemas y la salud humana. Estos contaminantes inorgánicos se liberan al ambiente a través de actividades industriales, agrícolas y metalúrgicas, así como por la inadecuada eliminación de residuos, fertilizantes y pesticidas. En consecuencia, estos metales se acumulan en el agua, el suelo y la atmósfera, afectando los ciclos biogeoquímicos naturales y la calidad ambiental, cuya persistencia y no biodegradabilidad agravan el problema (Briffa et al., 2020).

El medio ambiente –entendido como el conjunto de condiciones que rodean y sustentan la vida– está conformado por la biósfera, la atmósfera, la litósfera y la hidrósfera (sus componentes principales) que interactúan de manera dinámica. No obstante, la creciente presencia de contaminantes inorgánicos y orgánicos ha alterado el equilibrio natural del planeta. Al respecto, los metales pesados, en particular, representan una amenaza significativa que afecta simultáneamente distintas esferas de la Tierra, reduciendo la biodiversidad y modificando los procesos ecológicos esenciales. Por ello, su estudio y control resultan fundamentales para mantener la estabilidad de los ecosistemas (Masindi & Muedi, 2018).

En este punto, cabe recordar que se denomina metales pesados a los elementos con alta densidad o elevado peso atómico, características que de-

terminan su persistencia y toxicidad ambiental. Aunque el término se usa para referirse a metales peligrosos, también abarca metaloides como el arsénico y el selenio, que presentan efectos tóxicos similares. Por otro lado, se debe señalar que algunos metales pesados (como el oro) no son dañinos para el ambiente, aunque la exposición prolongada a otros (como plomo, mercurio o cadmio) representa un grave riesgo para la salud y los ecosistemas, debido a su bioacumulación y capacidad de alterar funciones biológicas esenciales (Briffa et al., 2020).

Durante el último siglo, la acelerada industrialización y el crecimiento urbano han intensificado la explotación de recursos naturales, incrementando la contaminación ambiental a escala global. Así, actividades como la minería, la quema de combustibles fósiles y los procesos metalúrgicos han liberado grandes cantidades de metales tóxicos al entorno. De la misma manera, otros contaminantes (como compuestos orgánicos, radionúclidos y nanopartículas) inciden en la degradación de los ecosistemas. Esta combinación de factores ha generado un escenario crítico que requiere estrategias sostenibles de mitigación, monitoreo y restauración ambiental (Gautam et al., 2016).

1.4.1. Tipos de contaminación ambiental por metales pesados

Según Briffa et al. (2020), los metales pesados ingresan al ecosistema por procesos naturales y por actividades humanas, afectando la hidrósfera, la litósfera y la atmósfera. Su dispersión se ve influida por factores como la temperatura, la presión, la circulación del agua y las corrientes de aire, lo que facilita su acumulación y persistencia en el ambiente, originándose así distintos tipos de contaminación que alteran los ecosistemas y disminuyen la calidad de los recursos.

A. Contaminación del suelo. Tanto deliberada como accidental, proviene del uso de aguas residuales, pesticidas, relaves mineros, lodos de depuradora y derrames industriales, los cuales introducen metales pesados que no se degradan y permanecen por largo tiempo en el ambiente. Estos metales alteran las propiedades físicas y químicas del suelo, reducen su fertilidad y se incorporan a la cadena alimentaria a través de las plantas, generando riesgos para la salud humana y el ecosistema.

B. Contaminación del agua. Proviene principalmente de la urbanización y la industrialización, ya que las escorrentías transportan metales pesados desde zonas agrícolas, urbanas e industriales hacia ríos y mares, donde se acumulan en los sedimentos y afectan gravemente a los ecosistemas acuáticos. Estos metales no se degradan fácilmente y se incorporan a la cadena alimentaria, aumentando su concentración a medida que ascienden los niveles tróficos hasta llegar al ser humano.

C. Contaminación del aire. Originada principalmente por la urbanización y la industrialización, libera metales pesados y partículas finas a través de actividades naturales y humanas, como la quema de combustibles fósiles, la fundición y el tráfico vehicular. Al dispersarse por el aire según la altura de las chimeneas, las condiciones climáticas y las corrientes de viento, genera problemas de salud, lluvia ácida, corrosión y deterioro ambiental.

En suma, la presencia de metales pesados en los distintos componentes ambientales refleja la estrecha relación entre las actividades humanas y los procesos naturales. En ese sentido, la gestión sostenible de los recursos, el fortalecimiento de las políticas ambientales y el desarrollo de tecnologías limpias son esenciales para mitigar sus impactos y prevenir su acumulación. Del mismo modo, la educación ambiental y la conciencia social resultan claves para reducir las fuentes de emisión y promover prácticas que protejan los ecosistemas y la salud pública (Briffa et al., 2020).

1.4.2. Destino de los metales pesados en el ecosistema

La toxicidad de los metales pesados aumenta cuando se acumulan localmente, lo que ha llevado a construir chimeneas más altas para dispersar las emisiones; sin embargo, esto puede favorecer la formación de lluvia ácida. Aunque el planeta se percibe como un sistema único, en realidad está dividido en compartimentos como organismos o células, donde los metales pueden almacenarse en depósitos insolubles que evitan interacciones dañinas, y debido a su carácter no biodegradable, persisten por años en suelos o sedimentos. Además, en algunos casos reaccionan y se transforman en formas más tóxicas, como el metilmercurio generado por bacterias (Briffa et al., 2020).

En este contexto, la actividad humana ha provocado concentraciones anómalas de metales en antiguos sitios mineros o agrícolas donde se usaron pesticidas metálicos, lo que ha dejado una vegetación escasa y especies resistentes. Aunque su uso fue abandonado, estos pesticidas contenían arsénico, cobre, plomo y cromo, y han dejado residuos en muchas zonas, lo que demuestra la persistencia y movilidad prolongada de estos elementos en el ambiente (Gupta et al., 2012). Para mitigar el riesgo, se aplica el taponamiento, una técnica que aísla el suelo contaminado con capas impermeables y tierra limpia para impedir la filtración de metales a las aguas subterráneas.

Asimismo, el uso de lodos industriales ha generado suelos contaminados con cadmio, plomo, zinc y otros metales. Por su lado, las fundiciones liberan contaminantes que se depositan en áreas cercanas, provocando la desaparición de la fauna del suelo y de la vegetación. También se han identificado otras fuentes, como la gasolina con plomo y artículos de caza o pesca que aún afectan humedales. A pesar de que muchos de estos productos han sido restringidos, su legado ambiental persiste porque la movilidad del metal depende del pH, la arcilla y la materia orgánica, de modo que en suelos ácidos los metales se vuelven más solubles y se filtran fuera del alcance radicular (Briffa et al., 2020).

Finalmente, los ríos que atraviesan zonas industriales arrastran metales pesados que acaban en el mar, donde el cambio en el pH reduce su solubilidad, haciendo que se precipiten hacia el lecho marino. Esto crea una acumulación en los sedimentos, afectando a largo plazo los ecosistemas acuáticos; además, la disminución de la corriente en el mar facilita esta sedimentación. Por tanto, es clave controlar la contaminación desde su origen para evitar su expansión, ya que la interacción entre el pH y los metales define su destino en los cuerpos de agua y determina su impacto ambiental (Gupta et al., 2012).

1.5. Regulaciones y normativas de los metales pesados

La contaminación del ecosistema por acumulación de metales pesados se ha transformado en un problema crítico que incide directamente en la crisis ecológica y en la salud humana, pues su ingreso al organismo ocurre principalmente a través de la cadena alimentaria cuando estos elementos tóxicos

presentes en agua, aire o suelos contaminados se incorporan a los alimentos. En este sentido, los metales pesados no solo alteran el funcionamiento de los ecosistemas, sino que constituyen un riesgo significativo para la vida humana y otras formas de existencia en el planeta (López, 2024).

En las últimas décadas, la rápida industrialización ha estado estrechamente ligada a un incremento paralelo en la contaminación del suelo, agua y aire, facilitando que metales pesados penetren de manera más rápida en los ecosistemas y generen impactos severos. Tales contaminantes pueden inhalarse, ingerirse o absorberse por la piel, los alimentos o el agua, por lo que resulta indispensable controlar su exposición para salvaguardar la salud humana. En consecuencia, las políticas de regulación cobran especial relevancia frente a este panorama (Singh et al., 2024).

Al acumularse en diversos órganos del cuerpo humano, metales no esenciales como plomo, arsénico, mercurio y cadmio pueden desencadenar múltiples trastornos, lo que ha motivado que organismos internacionales como la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) y la Administración de Alimentos y Medicamentos de los Estados Unidos (FDA) implementen regulaciones para limitar su presencia en alimentos para salvaguardar la salud pública. Dichas regulaciones pretenden establecer límites seguros, prevenir efectos tóxicos y mitigar su paso por la cadena alimentaria mediante controles más estrictos, así como promover mecanismos de evaluación continua e innovación normativa y técnica (López, 2024).

Por consiguiente, numerosas instituciones reguladoras han desarrollado marcos normativos y directrices destinadas a controlar la exposición humana a los metales pesados por el consumo de alimentos y agua, fijando niveles tolerables de ingesta y promoviendo mecanismos de vigilancia, revisión normativa y mejora continua. Estas regulaciones analizan las áreas de mejora y las deficiencias existentes en las normativas actuales frente a la contaminación por metales pesados, fomentando ajustes dinámicos y un mayor alcance institucional para fortalecer su eficacia, coherencia y cobertura ante este desafío ambiental (Singh et al., 2024).

1.5.1. Organismos reguladores de los metales pesados

En opinión de López (2024), la regulación de los metales pesados es esencial para proteger la salud humana y el medio ambiente debido a su toxicidad y persistencia. Al respecto, diversos organismos internacionales han establecido marcos normativos para limitar la exposición y mitigar los riesgos asociados, esfuerzos coordinados que buscan garantizar la seguridad alimentaria y ambiental a nivel global.

A. Organización Mundial de la Salud (OMS). Fundamental en la regulación internacional de los metales pesados, ya que desarrolla guías y recomendaciones que consideran tanto la exposición a corto plazo como los efectos acumulativos a largo plazo, influenciando así en la formulación de normativas en diversos países y promoviendo la protección de la salud pública a nivel global.

B. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). En conjunto con la OMS, establece normas internacionales como el Codex Alimentarius, que fija límites máximos permisibles de metales pesados en alimentos, garantizando con ello la seguridad alimentaria y sirviendo de base para que los países adapten sus propias regulaciones conforme a estas directrices.

C. Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA). Responsable de realizar evaluaciones exhaustivas sobre los riesgos que los metales pesados representan en alimentos dentro de la Unión Europea. Con ese fin, establece límites específicos para arsénico, plomo, cadmio y mercurio, asegurando con ello la protección especial de grupos vulnerables como niños y mujeres embarazadas.

D. Administración de Alimentos y Medicamentos (FDA). Regula los metales pesados en alimentos mediante límites expresados en partes por billón, aparte de promover campañas como “Closer to Zero” para minimizar la exposición en poblaciones sensibles. Adicionalmente, en California implementa regulaciones que consideran la ingesta diaria acumulativa, lo cual refleja un enfoque más integral y preventivo.

De esta manera, los organismos reguladores asumen un rol clave en la gestión de la contaminación por metales pesados al establecer estándares que protegen especialmente a las poblaciones más vulnerables. Por ello, es imperativo que las normativas evolucionen continuamente incorporando tecnologías de monitoreo y control. Igualmente, es preciso promover programas de educación ambiental que sensibilicen sobre los riesgos asociados y fomenten prácticas sostenibles (López, 2024).

1.5.2. Convenios internacionales sobre metales pesados

Conforme a la UNEP (UNEP, 2025), los convenios internacionales desempeñan un papel crucial en la regulación de los metales pesados, pues formulan marcos normativos que promueven la cooperación entre países para mitigar la contaminación transfronteriza. Estos acuerdos buscan armonizar políticas y prácticas para facilitar el intercambio de información y recursos, por lo que su implementación efectiva resulta esencial para proteger la salud humana y el medio ambiente.

A. Convenio sobre contaminantes atmosféricos transfronterizos a larga distancia (LRTAP). Busca limitar y reducir la contaminación atmosférica, incluida la transfronteriza, enfocándose en metales pesados como mercurio, plomo y cadmio. Entró en vigor el 29 de diciembre de 2003, promoviendo esfuerzos conjuntos entre las partes para mitigar los efectos nocivos de estos contaminantes.

B. Convenio de Rotterdam sobre el procedimiento de consentimiento fundamentado previo (CFP). Establece un proceso de consentimiento fundamentado previo para la importación de ciertos plaguicidas y productos químicos peligrosos, promoviendo la responsabilidad compartida entre países y contribuyendo al uso seguro de estos productos. Está en vigencia desde el 24 de febrero de 2004.

C. Convenio de Basilea sobre el control de los movimientos transfronterizos de los desechos peligrosos y su eliminación. Tiene como objetivo proteger la salud humana y el medio ambiente frente a los efectos adversos

de los desechos peligrosos, estableciendo un marco para su manejo y eliminación segura. Fue adoptado el 22 de marzo de 1989 y entró en vigor en 1992.

D. Convenio internacional sobre el control de los sistemas antiincrustantes nocivos en los buques. Busca prohibir el uso de organoestaños en pinturas antiincrustantes de buques con el fin de proteger la vida marina de los efectos tóxicos de estos compuestos. Está en vigencia desde el 17 de septiembre de 2008, y ha significado un paso importante en la regulación ambiental marina.

Así, la existencia y aplicación de estos convenios reflejan un compromiso global para enfrentar la contaminación por metales pesados. En consecuencia, la actualización y cumplimiento de estas normativas resultan fundamentales para abordar los desafíos emergentes, donde la cooperación internacional constituye un componente medular para garantizar un futuro sostenible y saludable para todos (UNEP, 2025).

CAPÍTULO II

CONTAMINACIÓN DEL AGUA EN AMÉRICA LATINA

La contaminación del agua en América Latina representa un desafío crítico para el desarrollo sostenible, dado que afecta tanto la salud humana como los ecosistemas. Diversos factores influyen en la ocurrencia de este fenómeno. Por ejemplo, diferentes actividades industriales, agrícolas y urbanas incrementan la presencia de contaminantes físicos, químicos y biológicos en cuerpos de agua, lo cual incide en la proliferación de enfermedades, la pérdida de biodiversidad y la degradación de recursos hídricos. Por ello, comprender las fuentes y los tipos de contaminación resulta fundamental para diseñar estrategias de gestión efectivas.

En tal sentido, los riesgos asociados a la contaminación hídrica requieren atención integral. Con ese propósito, se debe considerar tanto la protección de la salud pública como la preservación ambiental, ya que la exposición a contaminantes afecta directamente a comunidades vulnerables y puede limitar el acceso al consumo de agua segura, mientras que la degradación ambiental repercute en la productividad de ecosistemas y servicios ecosistémicos. Para abordar estos desafíos, se hace necesaria la implementación de soluciones técnicas y políticas que mitiguen los efectos negativos y promuevan un manejo sostenible de los recursos hídricos.

Dentro de este contexto, el tratamiento de aguas residuales y la generación de agua regenerada se presentan como herramientas estratégicas para mejorar la disponibilidad y calidad del agua, puesto que la inversión en infraestructura y tecnología permite reducir contaminantes, recuperar recursos valiosos y fortalecer la resiliencia de los sistemas urbanos y periurbanos. Al respecto, la planificación coordinada entre autoridades, comunidades y sector privado contribuye a maximizar los beneficios ambientales y socioeconómicos de estas intervenciones.

Por último, evaluar la rentabilidad y eficiencia de las soluciones implementadas requiere la aplicación de métodos como el análisis costo-beneficio, el análisis de costo-efectividad y el costo del ciclo de vida, herramientas efectivas para determinar la relación entre costos, beneficios y sostenibilidad, y que proporcionan información crucial en la toma de decisiones. De esa manera, al integrar criterios económicos, ambientales y sociales, se garantiza que las inversiones no solo sean viables financieramente, sino eficientes y responsables desde el punto de vista ecológico.

2.1. Contaminación hídrica en América Latina

La calidad del agua se ha convertido en una preocupación creciente para la salud pública a nivel mundial debido a que se encuentra estrechamente vinculada al bienestar de las comunidades. En América del Sur, estudios recientes han detectado la presencia de *Escherichia coli*, *Enterococcus* y otras bacterias en fuentes de agua potable, principalmente por la infiltración de aguas residuales en los sistemas de abastecimiento, producto de infraestructura sanitaria deficiente y redes de distribución deterioradas que representan una amenaza directa para la salud humana (Bacha et al., 2022).

En este contexto, América Latina y el Caribe (ALC) enfrentan desafíos significativos en materia de saneamiento básico, dado que una parte importante de la población— especialmente en zonas rurales— carece de servicios adecuados. A se suma la proliferación de algas tóxicas en áreas costeras e interiores que deterioran la calidad del agua, afectando la salud, los ecosistemas acuáticos y actividades económicas como la pesca y el turismo. Dicha situación genera pérdidas económicas y aumenta la vulnerabilidad social, por lo que la variabilidad climática y la contaminación no controlada podrían agravar esta problemática (Korc & Hauchman, 2021).

En Latinoamérica, aproximadamente la mitad de la población cuenta con servicio de alcantarillado; sin embargo, menos del 10 % del total de aguas recolectadas recibe tratamiento antes de ser descargadas. Como resultado, se estima que existen alrededor de 250 ciudades costeras con más de 100 000 habitantes que vierten aguas sin tratar a ríos, mares y lagos. Esto

contamina playas, productos agrícolas y pesqueros, perjudicando el turismo, la economía y la salud pública, al mismo tiempo que agrava la proliferación de enfermedades de origen hídrico y acelera la degradación de los ecosistemas acuáticos (Peña et al., 2018).

Por efecto de estas condiciones, los riesgos de enfermedades infecciosas y gastrointestinales aumentan considerablemente, afectando con mayor intensidad a poblaciones vulnerables que no cuentan con acceso a agua tratada ni con servicios de salud adecuados. Así, la exposición constante a patógenos en el agua compromete la seguridad alimentaria, la calidad de vida y el desarrollo infantil, pues los sistemas de vigilancia sanitaria suelen ser insuficientes para detectar y prevenir brotes a tiempo. Por ello, garantizar el acceso a agua segura resulta esencial para reducir la carga de enfermedades y proteger la salud pública (Bacha et al., 2022).

2.1.1. Impacto de la contaminación del agua en Latinoamérica

La contaminación del agua en Latinoamérica representa un problema ambiental y de salud pública, ya que afecta tanto a ecosistemas marinos como continentales, además de las fuentes subterráneas utilizadas para el consumo humano. Esta problemática está estrechamente vinculada a actividades agrícolas, industriales y urbanas que liberan compuestos químicos persistentes al entorno. De ahí que los cuerpos de agua presenten sustancias tóxicas que alteran la biodiversidad, contaminan cadenas alimentarias y ponen en riesgo la seguridad hídrica (Souza et al., 2022). Por ejemplo:

A. Mares. Contienen plaguicidas como malatión y otros organofosforados en sus aguas costeras. Estos alteran la biota acuática y aumentan los riesgos para la salud de las comunidades humanas cercanas, un reflejo del manejo insuficiente de los contaminantes en estas zonas (Nascimento et al., 2021; Riascos-Flores et al., 2021).

B. Ríos. Presentan concentraciones considerables de glifosato y su metabolito AMPA (ácido aminometilfosfónico), así como de pesticidas organoclorados persistentes debido a la lixiviación agrícola y descargas industriales,

generando impactos en la calidad del agua y en los ecosistemas ribereños (Pérez et al., 2021).

C. Lagos. Al igual que los cuerpos de agua dulce, contienen altos niveles de compuestos farmacéuticos y disruptores endocrinos, como estrógenos, lo que compromete la salud de organismos acuáticos y refleja deficiencias en los sistemas de tratamiento de aguas residuales (López-Velázquez et al., 2021).

D. Acuíferos y aguas subterráneas. Están contaminados principalmente por pesticidas usados en la agricultura, como atrazina y glifosato, debido a la lixiviación prolongada. Esto constituye un riesgo para el consumo humano y evidencia la vulnerabilidad de estas fuentes frente a actividades antropogénicas (Pérez et al., 2021).

Tales afectaciones evidencian una problemática que compromete tanto la sostenibilidad ambiental como el bienestar social, ya que involucra la degradación progresiva de distintos cuerpos hídricos, situación que revela limitaciones en las políticas de gestión ambiental, insuficiencia en el tratamiento de residuos y falta de control sobre prácticas productivas contaminantes. Por ello, se requiere fortalecer la gobernanza hídrica mediante estrategias preventivas, normativas efectivas y educación ambiental que mitiguen el deterioro actual, cuya atención prioritaria resulta imprescindible para garantizar el equilibrio ecológico y la salud humana en la región.

2.1.2. Fuentes de contaminación del agua en Latinoamérica

Las fuentes de contaminación del agua en Latinoamérica reflejan la interacción directa entre las actividades humanas y el deterioro ambiental, puesto que diversas prácticas productivas y urbanas introducen sustancias nocivas en los ecosistemas hídricos. Esta situación no solamente altera la composición físico-química del agua, sino que incrementa los riesgos sanitarios y ecológicos a nivel regional. En este contexto, resulta necesario identificar los principales focos de contaminación a fin de comprender su alcance y consecuencias (Souza et al., 2022). Por ejemplo:

A. Industrial. Las descargas de efluentes industriales inciden en la presencia de compuestos químicos y contaminantes emergentes en aguas superficiales y residuales, los cuales no son eliminados de manera eficaz por los sistemas de tratamiento convencionales y que, finalmente, afectan la salud pública (Chaves et al., 2020).

B. Minería. Las actividades mineras liberan metales pesados y una serie de sustancias químicas que llegan a los cuerpos de agua superficiales y subterráneos, elevando la exposición humana a estos contaminantes y perjudicando la biodiversidad acuática (Deknock et al., 2019).

C. Agricultura y ganadería. El uso intensivo de plaguicidas y fertilizantes en agricultura y ganadería genera lixiviación de estos compuestos hacia ríos, lagos y acuíferos, provocando la acumulación de residuos tóxicos que comprometen la calidad del agua y la salud de la población (Nascimento et al., 2021; Pérez et al., 2021).

D. Aguas residuales. El manejo inadecuado de aguas residuales facilita la introducción de pesticidas, fármacos y disruptores endocrinos a cuerpos de agua, una muestra de que existen deficiencias en los sistemas de tratamiento que aumentan la exposición humana a contaminantes emergentes (Chaves et al., 2020; López-Velázquez et al., 2021).

Estas fuentes de contaminación reflejan la influencia de modelos de desarrollo poco sostenibles, ya que la explotación intensiva de recursos naturales y la ausencia de control ambiental generan un deterioro progresivo de los ecosistemas hídricos, que se ve agravado por la limitada fiscalización estatal y la falta de tecnologías adecuadas de tratamiento. En consecuencia, se requiere fortalecer las políticas de gestión ambiental con un enfoque preventivo y articulado entre los sectores productivos y los Gobiernos, pues solo así será posible reducir las cargas contaminantes y proteger este recurso vital para las generaciones presentes y futuras.

2.2. Principales tipos de contaminación hídrica en América Latina

El estudio de la contaminación del agua permite comprender de manera más precisa la naturaleza y el origen de los agentes que degradan este recurso en Latinoamérica, dado que cada tipo implica distintos riesgos am-

bientales y sanitarios. En este sentido, las diversas formas de contaminación responden a procesos diferenciados pero interrelacionados, originados tanto por actividades humanas como por deficiencias estructurales en gestión ambiental. Por esa razón, su análisis resulta esencial para diseñar estrategias de control y remediación más efectivas (Souza et al., 2022).

2.2.1. Contaminación física

Constituye una de las principales problemáticas ambientales en Latinoamérica, por cuanto se relaciona directamente con la presencia de materiales sólidos y partículas que alteran las propiedades naturales de los cuerpos hídricos. Este tipo de contaminación es consecuencia de actividades humanas que generan residuos y materiales particulados que terminan en ríos, lagos y zonas costeras sin un adecuado control:

A. Residuos sólidos. En ríos y lagos generan obstrucción de cauces y afectan la calidad del agua, provocando alteraciones en los ecosistemas acuáticos y aumentando riesgos sanitarios para las poblaciones cercanas, lo cual da cuenta de una gestión inadecuada de desechos urbanos (Pemberthy et al., 2020).

B. Plásticos. En aguas superficiales y costeras, la presencia de microplásticos y macroplásticos se ha incrementado, alterando la fauna acuática y favoreciendo la acumulación de contaminantes químicos adsorbidos, lo que constituye un riesgo ecológico y para la salud humana (Riascos-Flores et al., 2021).

C. Sedimentos. Generados por la erosión derivada de actividades agrícolas e intervenciones urbanas, transporta plaguicidas, fertilizantes y otros compuestos tóxicos hacia ríos, lagos y humedales, alterando la composición química y física de los sedimentos (Pérez et al., 2021).

Este tipo de contaminación refleja la falta de planificación ambiental y la débil implementación de políticas de gestión de residuos que se efectúan en la región, una evidencia de que existe un bajo nivel de conciencia ambiental por parte de las comunidades y de los sectores productivos que continúan generando desechos sin control. Por ese motivo, resulta indispensable promover estrategias que prioricen el manejo responsable de residuos y la protección de los recursos hídricos.

2.2.2. Contaminación química

Constituye una amenaza creciente para los ecosistemas acuáticos y la salud humana en Latinoamérica a consecuencia de la incorporación de sustancias tóxicas derivadas de actividades productivas y domésticas. Este tipo de contaminación altera las características naturales del recurso hídrico porque introduce compuestos persistentes y de difícil eliminación que se acumulan progresivamente. Por ejemplo:

A. Pesticidas. Incluyen atrazina, glifosato y organofosforados, se detectan en aguas superficiales y subterráneas, con concentraciones que reflejan la intensidad de su uso agrícola y la ineficacia de los sistemas de tratamiento, por lo que representan un riesgo para la salud humana y los ecosistemas (Nascimento et al., 2021; Pérez et al., 2021).

B. Fertilizantes. El exceso de fertilizantes nitrogenados y fosfatados lixiviados hacia cuerpos de agua desencadena eutrofización, lo cual favorece el crecimiento de algas y afecta la calidad del agua para el consumo y uso recreativo (Riascos-Flores et al., 2021).

C. Compuestos industriales. Los compuestos industriales, como metales pesados y contaminantes persistentes, ingresan a ríos y lagos mediante efluentes. Estos compuestos muestran gran resistencia a los tratamientos convencionales y generan efectos tóxicos sobre la biota acuática y la salud humana (Deknock et al., 2019).

D. Productos farmacéuticos. Incluyen antidepresivos, antibióticos y cafeína, los cuales se encuentran en aguas superficiales y residuales en concentraciones que reflejan un alto consumo y deficiencias en su eliminación, con un efecto potencial sobre organismos acuáticos y humanos (Chaves et al., 2020; Pemberthy et al., 2020).

E. Contaminantes emergentes. En aguas residuales y superficiales se detectan sustancias tales como disruptores endocrinos y productos no legislados, lo que evidencia un desafío regulatorio y riesgos para la salud pública debido a su persistencia y actividad biológica, incluso en bajas concentraciones (López-Velázquez et al., 2021).

Así, la contaminación química refleja una problemática compleja que está asociada tanto a la intensificación de actividades humanas como a la limitada capacidad institucional para controlar los vertimientos. Asimismo, muestra la ausencia de tecnologías avanzadas de depuración capaces de remover compuestos persistentes y peligrosos. Por ello, se requiere la implementación de políticas integrales que regulen su uso y reduzcan la carga contaminante en los ecosistemas acuáticos.

2.2.3. Contaminación biológica

Constituye una de las formas más preocupantes de degradación hídrica en Latinoamérica, debido a que introduce microorganismos patógenos que amenazan seriamente la salud pública y los ecosistemas acuáticos. Este tipo de contaminación está estrechamente vinculado a la deficiente gestión de aguas residuales y a la falta de infraestructura de saneamiento en amplias zonas rurales y urbanas. Algunos agentes patógenos son estos:

A. Virus. Presentes en aguas superficiales y residuales, constituyen una amenaza sanitaria importante, en especial donde los sistemas de tratamiento son deficientes. Su presencia está relacionada con la contaminación por desechos humanos y descarga de aguas no tratadas, lo cual facilita la transmisión de enfermedades gastrointestinales. La exposición continua aumenta la incidencia de brotes en comunidades cercanas, ya que ciertos virus pueden persistir en el ambiente acuático y prolongar su efecto infeccioso (Pemberthy et al., 2020).

B. Bacterias. Presentes en ríos, lagos y acuíferos, principalmente coliformes fecales derivados de aguas residuales domésticas e industriales, cuya presencia indica la existencia de diversos patógenos capaces de afectar la salud humana. La exposición constante a estos microorganismos incrementa el riesgo de enfermedades gastrointestinales. Adicionalmente, la proliferación de bacterias resistentes a los antibióticos agrava los problemas sanitarios, por lo que mejorar el saneamiento y el tratamiento de aguas es un aspecto fundamental para mejorar la salud pública (Pemberthy et al., 2020).

C. Otros microorganismos. Incluyen protozoos, algas y hongos que proliferan en cuerpos de agua contaminados con nutrientes y residuos químicos. Su crecimiento puede generar desequilibrios ecológicos y liberar toxinas que afectan la salud humana. La presencia de estos microorganismos refleja la interacción entre la contaminación física, química y biológica, razón por la que es fundamental su monitoreo a fin de prevenir riesgos ambientales y sanitarios (Riascos-Flores et al., 2021).

La contaminación biológica, por tanto, pone en evidencia no solamente la precariedad en los servicios básicos, sino la falta de políticas efectivas para garantizar la calidad sanitaria del recurso hídrico. Aparte, revela la necesidad de fortalecer la vigilancia epidemiológica y el control de fuentes contaminantes. Por ello, es imprescindible implementar estrategias integrales que prioricen la prevención y el acceso a un saneamiento adecuado para toda la población.

2.3. Riesgos asociados a la contaminación hídrica en América Latina

La contaminación hídrica en América Latina representa un problema crítico para la salud pública, dado que el vertido de aguas residuales a ríos y mares sin un tratamiento adecuado expone directamente a la población a riesgos durante la realización de actividades recreativas como la natación o la pesca. En este sentido, las deficiencias en infraestructura y políticas ambientales dificultan una gestión eficiente del agua. Por tal motivo, es imprescindible implementar estrategias integrales que fortalezcan la gobernanza hídrica y promuevan la concientización social para prevenir consecuencias más graves y duraderas (Banco Mundial, 2017).

Se debe tener presente, por tanto, que las aguas residuales contienen sustancias peligrosas como metales pesados, microplásticos y pesticidas, los cuales se infiltran principalmente en el suelo y las aguas subterráneas, deteriorando la calidad del agua potable y alterando los ecosistemas acuáticos. De ahí que se requiera adoptar regulaciones estrictas y tecnologías de depuración avanzadas que permitan controlar los vertidos, además de impulsar una cultura de responsabilidad ciudadana hacia la protección de los recursos hídricos (Hamidian et al., 2021).

Como resultado de la contaminación del agua, se propagan diversas enfermedades, tales como diarreas, infecciones y problemas dermatológicos, que afectan principalmente a las poblaciones más vulnerables. Al mismo tiempo, deteriora los ecosistemas, disminuye la biodiversidad y limita la capacidad de autorregeneración de los cuerpos de agua. En este escenario, constituye un componente clave desarrollar programas de educación ambiental y monitoreo constante que promuevan prácticas sostenibles y la participación activa de todas las comunidades en la protección de las fuentes hídricas (Savanan et al., 2021).

Por consiguiente, enfrentar la contaminación hídrica implica no solo tratar eficientemente las aguas residuales. También es necesario recuperar y preservar los recursos hídricos mediante la integración de tecnologías de depuración y la concientización ciudadana, con el fin de mitigar los daños y garantizar la sostenibilidad a largo plazo. Del mismo modo, la cooperación entre Gobiernos, comunidades y organismos internacionales fortalece la gestión ambiental y posibilita implementar estrategias sostenibles que incluyan regulación, educación y acción comunitaria para proteger los cuerpos de agua en la región (Félix-López et al., 2023).

2.3.1. Salud humana

La salud humana se ve directamente afectada por la contaminación hídrica debido a que las aguas residuales, tratadas y sin tratar, contienen patógenos y sustancias tóxicas que pueden generar enfermedades y alterar la calidad de vida. Al respecto, hay que tomar en cuenta que la exposición constante a estos contaminantes compromete la seguridad alimentaria y el bienestar de las comunidades, lo cual hace evidente la necesidad de una gestión integral del agua que proteja tanto la salud como el entorno (Félix-López et al., 2023).

A. Enfermedades. Las aguas residuales sin tratar contienen bacterias, virus y parásitos que provocan enfermedades como diarrea y vómitos (Helmecke et al., 2020). Además, la Agencia de Protección Ambiental de EE. UU (EPA) identifica a los adenovirus, calicivirus, enterovirus y hepatitis A como virus comunes presentes en el agua (Rachmadi et al., 2020). Incluso algunos

adenovirus presentan resistencia a la desinfección por rayos ultravioleta (Humaira et al., 2020). Asimismo, el virus de la hepatitis A puede sobrevivir en el agua durante largos periodos y tardar hasta 56 días en inactivarse (Salvador et al., 2020).

Por otro lado, el uso excesivo de antibióticos ha favorecido que la *Escherichia coli* desarrolle genes de resistencia (Camiade et al., 2020). Dentro de este contexto, el 26,6 % de la población de Ecuador consume agua contaminada con esta bacteria fecal (Borja-Serrano et al., 2020). Asimismo, cerca de 2900 millones de personas consumen mariscos con presencia de bacterias fecales, y la falta de una gestión adecuada del agua incrementa la aparición de superinfecciones y mutaciones (Gyawali & Hewitt, 2020).

B. Bioaerosoles. Durante el tratamiento de aguas residuales se liberan bioaerosoles, compuestos por partículas biológicas como bacterias y hongos, que constituyen riesgos para la salud de trabajadores y comunidades cercanas. La exposición a estas partículas puede generar enfermedades respiratorias y otras afecciones. Además, producen olores desagradables que reducen la calidad de vida y afectan el valor de las propiedades y la actividad turística (Félix-López et al., 2023).

Asimismo, se ha identificado que estos bioaerosoles contienen bacterias patógenas oportunistas como *Staphylococcus aureus*, *Aeromonas hydrophila*, *Comamonas testosteroni*, *Moraxella osloensis*, *Pseudomonas stutzeri* y *Pseudomonas aeruginosa*, que pueden causar infecciones y complicaciones en personas expuestas, especialmente en poblaciones vulnerables. En consecuencia, los bioaerosoles generan impactos sanitarios y económicos, tales como la disminución de la productividad y el aumento de los gastos en salud (Banchon, 2021).

C. Seguridad alimentaria. El uso de aguas residuales tratadas y no tratadas para riego es frecuente en regiones áridas y semiáridas, alcanzando aproximadamente 8.42 millones de hectáreas (Helmecke et al., 2020). De esta superficie, el 49 % se riega con aguas sin tratar, las cuales presentan niveles elevados de patógenos y metales pesados que superan los límites internacio-

nales, lo que representa un riesgo directo para la salud humana y la calidad de los cultivos (Othman et al., 2021).

En este contexto, aunque las aguas residuales tratadas cumplen con límites de seguridad establecidos, su uso prolongado puede provocar acumulación de metales tóxicos en suelos y alimentos (Natasha et al., 2021). Dado que estos contaminantes pueden incorporarse a la cadena alimentaria, resulta indispensable implementar un monitoreo permanente y prácticas agrícolas sostenibles que garanticen la seguridad de los alimentos (Félix-López et al., 2023).

2.3.2. Medio ambiente

El medio ambiente se ve impactado por la gestión inadecuada de aguas residuales, ya que estas inciden en la degradación de ecosistemas, pérdida de biodiversidad y emisión de gases de efecto invernadero, afectando directamente el equilibrio ecológico. En este sentido, la contaminación hídrica altera los cuerpos de agua y el suelo, disminuyendo la capacidad de autorregeneración y aumentando la vulnerabilidad frente al cambio climático, lo que resalta la importancia de contar con políticas ambientales y tecnologías sostenibles (Félix-López et al., 2023).

A. Cambio climático. La gestión de aguas residuales también influye en el cambio climático, pues cuando no son tratadas adecuadamente pueden generar la emisión de gases de efecto invernadero y agravar aún más el calentamiento global (Zarei, 2020). No obstante, si se aprovechan de manera eficiente y tecnológica, pueden convertirse en una fuente de energía renovable y reducir considerablemente la huella de carbono del sistema hídrico (Félix-López et al., 2023).

Por otro lado, se estima que, en los 2025 dos tercios de la población mundial estarán enfrentado escasez de agua a causa del cambio climático. Asimismo, para alimentar a una población proyectada de 9000 millones de personas en 2050, será necesario incrementar la producción de alimentos en al menos un 50 %. En este contexto, el uso de alrededor de 15 millones de metros cúbicos diarios de aguas residuales sin tratar para fines de riego se considera como una alternativa frente a la creciente demanda de recursos hídricos (Ungureanu et al., 2020).

2.4. Agua regenerada en el desarrollo hídrico de América Latina

El agua regenerada se ha convertido en una estrategia esencial para fortalecer la seguridad hídrica de América Latina ante la creciente escasez de agua y el impacto del cambio climático. Este recurso proviene del tratamiento avanzado de aguas residuales, lo que permite su reutilización segura en sectores como la agricultura, la industria y en la recarga de acuíferos, cuya implementación reduce la extracción de fuentes naturales y ayuda a preservar ecosistemas estratégicos. Aunque requiere tecnologías eficientes que eliminen contaminantes químicos y microbiológicos, se posiciona como una herramienta clave dentro de la gestión hídrica sostenible (Helmecke et al., 2020).

En este contexto, el sector agrícola es el principal beneficiario del uso de agua regenerada, por cuanto concentra el mayor consumo de recursos hídricos en la región, donde países como México, Chile y Perú han implementado proyectos que mejoran la productividad de los cultivos sin depender exclusivamente del agua dulce. De esta manera, dicha práctica contribuye a estabilizar la producción en tiempos de sequía o estrés hídrico, pese a que persisten desafíos relacionados con la percepción social y la disponibilidad de infraestructura adecuada, por lo que se precisa de mayor inversión y capacitación técnica para su expansión (Gil-Meseguer et al., 2019).

El desarrollo de esta alternativa enfrenta, sin embargo, importantes obstáculos institucionales y normativos, pues en numerosos países latinoamericanos no existen marcos legales claros que establezcan estándares de calidad, monitoreo y responsabilidades en la gestión del agua regenerada. Esta falta de regulación produce desconfianza en los usuarios y limita la implementación de proyectos a gran escala. Más aún, la ausencia de políticas homogéneas dificulta la cooperación entre municipios y sectores productivos, si bien la creciente presión hídrica ha impulsado iniciativas legislativas más recientes (Avellán et al., 2022).

Por lo tanto, el uso de agua regenerada no solo aporta beneficios ambientales, sino también oportunidades económicas y sociales para la región, ya que sus proyectos de recuperación de recursos hacen posible generar empleo,

producir energía a partir de biogás y aprovechar nutrientes presentes en los biosólidos. Estas iniciativas contribuyen al desarrollo de una economía circular del agua y al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible. A la vez, fortalecen la resiliencia frente a los efectos del cambio climático en comunidades vulnerables, por lo que su implementación adecuada resulta estratégica para el futuro hídrico latinoamericano (Cardoso et al., 2019).

2.4.1. Tratamiento de aguas residuales en Latinoamérica

América Latina muestra un desempeño notable en términos de acceso al agua, ya que el 94 % de los hogares cuenta con fuentes de agua mejoradas (Cepal, 2023). No obstante, alrededor del 17 % de la población aún carece de acceso a instalaciones de saneamiento adecuadas. A pesar de ello, entre 1990 y 2015, países como Bolivia, Honduras y Ecuador mostraron avances importantes en este ámbito (Félix-López et al., 2023). Asimismo, en 2015, otras naciones, como Guatemala, Haití y Nicaragua, todavía presentaban niveles bajos de acceso, aun cuando se registraron incrementos que oscilaron entre el 28 y el 85 % (Bertoméu-Sánchez & Serebrisky, 2018).

Aunque en la actualidad se han registrado mejoras en el tratamiento de aguas residuales, en 2017 solamente se trataba entre el 30 y el 40 %, lo que demuestra que los niveles actuales todavía permanecen por debajo de los estándares requeridos para una región de elevada urbanización (Jones et al., 2021). Incluso así, este avance resulta significativo si se compara con una década atrás, cuando apenas el 15 % de las aguas residuales recibía tratamiento y solo el 6 % cumplía con estándares aceptables (Félix-López et al., 2023).

En este escenario, las lagunas de oxidación se emplean ampliamente como método principal de tratamiento de aguas residuales en la región (Unesco, 2017). Al respecto, Noyola et al. (2012) analizó 2734 plantas de tratamiento, siendo México el país con mayor número de estas (1653), seguido de Brasil (702) y Chile (175). Asimismo, tres tecnologías de tratamiento de aguas residuales representaron cerca del 80 % de uso: lagunas de estabilización (38 %), sistemas de lodos activados (26 %) y reactores anaeróbicos de flujo ascendente (17 %), los cuales funcionan mediante procesos naturales

como la luz solar y la acción de microorganismos, que descomponen la materia orgánica y depuran el agua.

Por consiguiente, aunque América Latina ha logrado avances en el tratamiento de aguas residuales, la cobertura sigue siendo insuficiente y persisten brechas significativas entre países. El predominio de tecnologías extensivas, como las lagunas de oxidación, representa una solución viable y de bajo costo, pero insuficiente frente a las crecientes demandas de urbanización, el crecimiento poblacional y estándares ambientales más exigentes. Por ello, es necesario fortalecer la gestión institucional, impulsar tecnologías más eficientes y promover un tratamiento de aguas residuales sostenible que proteja la salud pública y los ecosistemas (Félix-López et al., 2023).

2.4.2. Inversión pública en el sector del agua en Latinoamérica

En América Latina, la prestación de servicios de agua y saneamiento enfrenta desafíos estructurales vinculados a la limitada disponibilidad y a la calidad deficiente del servicio, lo que genera efectos negativos en la salud pública y el desarrollo social. Considerando que la inversión en este sector representa menos del 3 % del PBI, frente al 4 a 8 % de otras regiones en desarrollo, garantizar un financiamiento suficiente sigue siendo un obstáculo central para alcanzar estándares adecuados (Brichetti et al., 2021). Bajo esta perspectiva, se requiere una planificación sostenible que asegure recursos constantes hasta 2030 y permita mejorar tanto el acceso como la calidad de los servicios (Félix-López et al., 2023).

A esta situación se suma el que muchas empresas de servicios públicos del sector hídrico presentan una baja solvencia financiera, lo que limita su acceso a préstamos comerciales y pone de manifiesto que solo una minoría tiene la capacidad de movilizar financiamiento privado. Adicionalmente, debido a que la eficiencia operativa influye directamente en la generación de ingresos, su fortalecimiento resulta clave para promover la inversión, disminuir la dependencia de recursos públicos y garantizar la sostenibilidad del servicio. En consecuencia, cualquier estrategia al respecto debe incluir reformas institucionales que fortalezcan la viabilidad económica de estas entidades y pro-

muevan la participación del sector privado bajo marcos regulatorios claros (Brichetti et al., 2021).

En última instancia, el bajo interés de la inversión privada en el sector hídrico se debe a factores económicos, regulatorios y a una rentabilidad limitada. Por tal razón, dado que la mayoría de las plantas de tratamiento sigue bajo propiedad pública y opera con distintos niveles de supervisión centralizada, se vuelve indispensable contar con indicadores económicos sólidos que orienten la asignación de recursos, la planificación de inversiones y la fijación de tarifas. Esto facilitaría la recuperación de costos, mejoraría la eficiencia del servicio, protegería el medio ambiente y aseguraría la viabilidad a largo plazo, al tiempo que fortalecería los sistemas de información necesarios para respaldar decisiones estratégicas en el sector hídrico (Félix-López et al., 2023).

2.5. Rentabilidad del tratamiento de aguas residuales en América Latina

Con base en Félix-López et al. (2023), la rentabilidad del tratamiento de aguas residuales depende del tamaño de la comunidad, el nivel de tratamiento y las condiciones ambientales, por lo que su evaluación debe considerar no solo los costos, sino también los impactos en la salud, el ambiente y la economía. Desde esa perspectiva, modelos como la generación de energía con biogás o la venta de lodos tratados ayudan a reducir costos, generar ingresos y mejorar la sostenibilidad, aunque la selección del método para medirla depende del contexto, los objetivos y las prioridades de cada proyecto. A continuación, se presentan algunos métodos comunes:

2.5.1. Análisis de costo-beneficio (ACB)

Consiste en comparar los costos de implementación y operación de sistemas de tratamiento de aguas residuales con los beneficios asociados a la mejora de la calidad del agua, la reducción de riesgos sanitarios y otros impactos ambientales y sociales. Asimismo, permite determinar si los beneficios sociales superan los costos, expresados ambos en términos monetarios, por lo que es ampliamente utilizado en proyectos de inversión pública donde los resultados

pueden cuantificarse. De esta manera, contribuye a priorizar proyectos que generen mayor valor para la sociedad.

No obstante, el ACB enfrenta desafíos importantes, como la dificultad para valorar beneficios intangibles, predecir impactos a largo plazo y evitar sesgos en la toma de decisiones. En adición, variables como el valor actual neto (VAN) y la tasa interna de retorno (TIR) son esenciales para estimar la rentabilidad del proyecto. A esto se suman elementos como los precios sombra, los factores de conversión y la disposición de los usuarios a pagar, por lo que su correcta aplicación requiere información fiable y criterios metodológicos correctamente definidos y claros.

En América Latina, la disposición a pagar está condicionada por factores socioeconómicos como el presupuesto familiar, el nivel educativo, la ubicación geográfica o la tasa de descuento social. Por eso, aunque el análisis financiero es importante, no debe ser el único criterio, ya que los beneficios socioeconómicos y ambientales tienen un peso mayor en los proyectos de recuperación de agua. En consecuencia, el ACB debe complementarse con evaluaciones sociales y ambientales para una toma de decisiones integral, garantizando que las inversiones respondan a la eficiencia económica y al bienestar colectivo.

2.5.2. Análisis de costo-efectividad (ACE)

Compara los costos de diferentes opciones de tratamiento de aguas residuales en relación con su eficacia para alcanzar resultados específicos, como la eliminación de contaminantes o la reducción de riesgos para la salud. A diferencia del análisis de costo-beneficio (ACB), que monetiza tanto costos como beneficios para determinar la conveniencia general de una intervención, el ACE se enfoca en identificar la opción más eficiente en términos de relación costo-efectividad. En este sentido, un proyecto con un ACE alto consigue sus objetivos manteniendo bajos los costos, lo que demuestra un uso eficiente de los recursos y una adecuada relación calidad-precio.

En Pekín, por ejemplo, la implementación de un programa de recuperación y reutilización de aguas residuales generó beneficios netos de 100 millones de dólares al año, demostrando que los beneficios superan ampliamente

los costos, cuyo beneficio resultó 1,7 veces superior al costo total invertido, demostrando su viabilidad económica. Además, el costo por eliminación de contaminantes, como el fósforo, es un indicador clave de eficiencia, con valores que varían entre los 42.22 y 60.88 dólares por libra de fósforo removido según la tecnología utilizada, resultados que respaldan la utilidad del ACE para comparar tecnologías de tratamiento y optimizar inversiones.

Las nuevas plantas de tratamiento pueden no ser rentables si solo se consideran los costos relacionados con la salud pública, especialmente al incluir infraestructura como alcantarillado y conexiones domiciliarias. No obstante, si se incorporan los beneficios ambientales, los resultados pueden cambiar significativamente. Por eso, se requiere un ACE más integral en zonas urbanas y periurbanas, donde el uso informal de aguas residuales es común. La combinación de sistemas de bajo consumo energético, como las lagunas de oxidación usadas en Latinoamérica, que cuentan con infraestructuras centralizadas, puede reducir riesgos, aunque modificaría la rentabilidad en términos de salud pública.

2.5.3. Análisis del costo del ciclo de vida (ACCV)

Constituye una herramienta esencial para evaluar la rentabilidad de distintas opciones de tratamiento, ya que permite relacionar los costos de operación con los niveles de tratamiento alcanzados y los beneficios ambientales derivados. Al incorporar variables como la densidad poblacional y los ingresos de las comunidades afectadas, facilita una asignación de recursos más eficiente y estratégica, a la vez que hace posible identificar los factores que influyen en los costos y diseñar políticas que optimicen los programas de reutilización de agua. Del mismo modo, considerar elementos como infraestructura, calidad del afluente y consumo energético contribuye a una visión integral del proyecto.

Adicionalmente, los métodos de evaluación del valor del sistema, como el análisis del ciclo de vida (ACV) y el costo del ciclo de vida (CCV) amplían la perspectiva al incluir tanto los impactos ambientales como los costos económicos a lo largo del ciclo de vida de las tecnologías de tratamiento. Al combinar ACV y CCV, se obtiene información detallada sobre la sostenibilidad

y viabilidad económica de los proyectos de recuperación de aguas residuales, lo que posibilita comparar alternativas de tratamiento y priorizar inversiones. Este enfoque integrado es particularmente útil para decisiones estratégicas en contextos urbanos y periurbanos, donde la gestión del agua requiere balancear eficiencia económica y protección ambiental.

Por otra parte, la incorporación del costo del ciclo de vida ambiental (CCVA) refuerza la gestión sostenible al estimar costos completos asociados a todo el ciclo del agua regenerada, superando las limitaciones de los métodos contables tradicionales. Así, mediante la combinación de ACV, CCV, CCVA y análisis econométrico, los gestores ambientales pueden evaluar de manera integral los costos y las consecuencias ambientales de los proyectos, asegurando decisiones informadas y responsables. En consecuencia, la integración de principios económicos, ambientales y técnicas de gestión permite a las políticas públicas promover la sostenibilidad, mitigar impactos negativos y asegurar la eficiencia de las estrategias de gestión de aguas residuales.

En conclusión, la rentabilidad del tratamiento de aguas residuales en América Latina depende de un enfoque multidimensional que integre eficiencia económica, sostenibilidad ambiental y bienestar social. Al implementar estrategias adaptadas a las características locales, se maximizan los beneficios y minimizan los riesgos asociados a la gestión del agua. Asimismo, la planificación coordinada entre tecnologías, políticas públicas y comunidades fortalece la resiliencia de los sistemas urbanos y periurbanos, por lo que los proyectos de tratamiento optimizan recursos, a la vez que contribuyen al desarrollo sostenible y a la equidad regional (Félix-López et al., 2023).

CAPÍTULO III

ECOTOXICIDAD DE METALES PESADOS EN SISTEMAS HÍDRICOS DE AMÉRICA LATINA

Los metales pesados presentes en sistemas hídricos representan un desafío ambiental importante, ya que su persistencia y toxicidad afectan tanto a organismos acuáticos como a comunidades humanas. Estos elementos pueden desplazarse a través del agua, sedimentarse o incorporarse a la biota, generando impactos complejos y difíciles de controlar. Su comportamiento es influenciado por factores químicos y físicos que regulan su movilidad y disponibilidad. Por ello, es fundamental comprender los mecanismos que regulan su transporte y transformación en los ecosistemas acuáticos.

Asimismo, la bioacumulación y la interacción de los metales pesados con componentes del agua incrementan los riesgos sobre la salud de los ecosistemas, dado que los organismos pueden concentrar toxinas en sus tejidos, propagando efectos a niveles tróficos superiores. En tal sentido, dicho fenómeno no solo altera la biodiversidad, sino que compromete los servicios ecológicos y la calidad del agua destinada al consumo humano. Por consiguiente, evaluar el impacto sanitario y ambiental se vuelve un paso crucial para la gestión responsable de los recursos hídricos.

En este contexto, es determinante detectar la presencia de metales pesados. Para ello, se han desarrollado múltiples técnicas que permiten identificar y cuantificar contaminantes con alta precisión. Por ejemplo, la espectrometría de absorción atómica, la espectrometría de plasma de acoplamiento inductivo y diversos métodos fotométricos y electroquímicos facilitan la caracterización de aguas y sedimentos, pues proporcionan información clave para diseñar estrategias de mitigación y remediación. Además, permiten monitorear la eficacia de tratamientos y evaluar riesgos potenciales de exposición a largo plazo.

Por último, las estrategias de tratamiento para remover metales pesados incluyen métodos convencionales y no convencionales, cada uno con venta-

jas y limitaciones según las condiciones del sistema hídrico. Los tratamientos físicos, químicos y biológicos empleados buscan reducir la concentración de contaminantes a niveles seguros. Casos documentados en América Latina, como de los ríos Rímac, Atrato y Atoyac, ponen de manifiesto la magnitud del problema de contaminación severa. En ese sentido, la combinación de técnicas de detección y remediación se presenta como una herramienta integral para la gestión ambiental.

3.1. Comportamiento de los metales pesados en sistemas hídricos

De acuerdo con Barrón (2021), el comportamiento de los metales pesados en sistemas hídricos representa un problema ambiental crítico debido a su persistencia, toxicidad y capacidad de desplazamiento en el agua, sedimentos y organismos vivos. Su movilidad y transformación depende de factores como el pH, salinidad y potencial redox, por lo que comprender su dinámica resulta esencial para evaluar riesgos ecológicos y sanitarios.

3.1.1. Transporte y movilidad

El transporte de metales pesados en los cuerpos de agua depende de factores físicos y químicos que influyen en su desplazamiento. En aguas superficiales, estos elementos pueden movilizarse de tres maneras: adheridos a partículas, en forma coloidal o disueltos en el agua, lo que facilita su dispersión a lo largo de un sistema hídrico. La velocidad de flujo, la presencia de descargas industriales y la pendiente del terreno determinan su movimiento y dispersión. Cuando se filtran al suelo a través de la irrigación, pueden percolar hacia los acuíferos, lo cual depende de la permeabilidad del terreno, por lo que la velocidad de ese movimiento está vinculado a las condiciones ambientales del ecosistema acuático y terrestre.

Por su parte, la movilidad de los metales pesados se incrementa en ambientes con cambios físico-químicos como variaciones de pH, salinidad o potencial redox, cuyas fluctuaciones pueden liberar metales inicialmente retenidos en sedimentos o suelos e incorporarlos nuevamente al agua. En zonas agrícolas,

el uso de aguas residuales con alta salinidad aumenta el transporte de cadmio, cobre, plomo y zinc hacia el perfil del suelo. Adicionalmente, estos elementos pueden desplazarse a mayor profundidad durante las lluvias intensas o el riego continuo.

3.1.2. Especiación química y solubilidad

La especiación química hace referencia a las formas químicas específicas en las que se encuentran los metales pesados, lo cual determina su toxicidad y disponibilidad en el agua. En medios acuáticos pueden presentarse como iones libres, complejos orgánicos o inorgánicos, y partículas coloidales. La solubilidad depende de factores como el pH y el potencial redox, razón por la que en aguas ácidas los metales tienden a permanecer en solución; sin embargo, las condiciones alcalinas favorecen su precipitación como hidróxidos insolubles. En este sentido, la especiación controla el comportamiento ambiental de los metales y su impacto en organismos acuáticos.

Así, los cambios en la solubilidad afectan directamente la concentración de metales pesados disueltos, como el hierro y el manganeso (que se solubilizan en condiciones reductoras), mientras que el plomo y el cadmio pueden formar complejos con materia orgánica. Estos complejos son más estables y pueden mantenerse en suspensión prolongadamente, facilitando su transporte; además, la presencia de carbonatos puede generar sales insolubles que precipitan y se acumulan en sedimentos. Por tanto, la solubilidad está estrechamente relacionada con la especiación química y condiciona tanto la movilidad como la persistencia de estos contaminantes.

3.1.3. Adsorción y desorción

La adsorción es un proceso mediante el cual los metales pesados se fijan a partículas del suelo o sedimentos, reduciendo su disponibilidad en el medio acuático, fenómeno que ocurre principalmente sobre arcillas, óxidos metálicos, sílice y materia orgánica, los cuales actúan como superficies activas. La intensidad de adsorción depende del pH, ya que valores altos favorecen la retención

de cationes metálicos; en tanto, la composición del acuífero determina la capacidad de almacenamiento de estos elementos. Por tal motivo, la adsorción constituye una barrera natural frente a la contaminación.

La desorción consiste, en cambio, en la liberación de metales previamente retenidos, a los que reintegra al agua. Esto ocurre cuando se modifican las condiciones químicas del entorno, como un aumento de salinidad o una disminución del potencial redox. Si eso sucede se produce una competencia entre cationes que desplaza a los metales desde las superficies donde estaban adsorbidos. Un aumento en sodio o calcio, por ejemplo, puede desplazar zinc o cadmio del suelo. De esta manera, la desorción incide en la movilización de metales pesados y aumenta el riesgo de contaminación hídrica.

3.1.4. Precipitación y disolución

La precipitación ocurre cuando los metales pesados reaccionan con otros compuestos y forman sales insolubles que se depositan en sedimentos o suelos. Este proceso es común en ambientes con pH relativamente alto, donde los metales forman hidróxidos o carbonatos. En este sentido, elementos como hierro, plomo y aluminio suelen precipitar como compuestos insolubles, fases sólidas que pueden representar una reserva de contaminación latente. Por tanto, la precipitación es una forma de inmovilización temporal, no una solución sostenida.

La disolución, por su parte, constituye el proceso opuesto, pues permite que los metales regresen a la fase acuosa, aumentando su biodisponibilidad. En este contexto, factores como la acidificación del agua o la disminución del pH aceleran dicho fenómeno, debido a que los compuestos precipitados se solubilizan con gran facilidad. Además, el aumento de materia orgánica puede formar complejos estables con metales pesados, favoreciendo su permanencia en el agua, fenómeno que resulta frecuente en zonas impactadas por actividades mineras o industriales. De esa forma, la disolución facilita la dispersión y toxicidad de los metales pesados.

3.1.5. Bioacumulación

La bioacumulación hace referencia al proceso mediante el cual los organismos absorben metales pesados presentes en el agua o el suelo que se almacenan en sus tejidos, proceso que ocurre cuando la velocidad de ingreso de esas sustancias supera la capacidad del organismo para eliminarlos. En este escenario, la bioacumulación de metales pesados como el mercurio, cadmio y plomo en peces y moluscos representa un riesgo grave para la salud humana al concentrarse en la cadena trófica, constituyéndose así en una amenaza ecológica y sanitaria.

Este fenómeno, que afecta a organismos individuales, se amplifica a través de la biomagnificación, pues a medida que los depredadores consumen presas contaminadas, la concentración de metales aumenta al transferirse entre niveles superiores de la cadena alimentaria. Los ecosistemas acuáticos son especialmente vulnerables debido a la persistencia de estos elementos; además, la exposición prolongada puede generar daños en los sistemas nervioso, renal y reproductivo. Tomando en cuenta estas consideraciones, la bioacumulación es un indicador clave de contaminación ambiental por metales pesados.

El comportamiento de dichos metales en los sistemas hídricos obedece a una dinámica compleja en la que intervienen múltiples procesos físico-químicos y biológicos que determinan su permanencia y circulación en el ambiente. Estas interacciones explican por qué su impacto puede extenderse desde el agua hasta los suelos, sedimentos y organismos vivos, lo que evidencia la necesidad de monitorear la presencia de metales pesados a lo largo del ciclo hidrológico. Además, la comprensión de los procesos mencionados permite orientar estrategias de prevención y control ambiental más efectivas, especialmente en zonas expuestas a actividades antrópicas. Por ello, el análisis de comportamiento de tales metales es un requisito clave para la gestión sostenible de los recursos hídricos.

3.2. Riesgos ocasionados por metales pesados en sistemas hídricos

La contaminación de sistemas hídricos por metales pesados representa una amenaza ambiental crítica debido a su persistencia y toxicidad acumulativa. Elementos como el arsénico, el cadmio, el plomo y el cobre no se degradan en el ambiente y permanecen activos durante largos periodos de tiempo. Debido a ello, se bioacumulan en organismos acuáticos y pasan a niveles superiores de la cadena trófica. Su presencia está asociada a actividades humanas como descargas industriales y agrícolas. Dicha situación incrementa el riesgo ecológico y sanitario en áreas cercanas a fuentes contaminadas (Yao et al., 2019).

En los ecosistemas acuáticos, estos elementos generan cambios en la composición química del agua y en sus propiedades naturales, cuya movilidad depende del pH, la salinidad y el potencial redox, que favorecen su disolución o precipitación. A medida que los metales se desplazan, afectan organismos sensibles como macroinvertebrados y peces, comprometiendo el equilibrio biológico y alterando los procesos ecológicos (Li et al., 2020).

En este contexto, aunque algunos metales como el cobre son micronutrientes esenciales en bajas proporciones, otros no poseen ninguna función biológica y resultan altamente nocivos. Por ejemplo, el cadmio y el plomo tienen una elevada toxicidad incluso en pequeñas cantidades. Esto se debe a su capacidad de interferir con procesos celulares, enzimáticos y estructurales en los seres vivos. A su vez, estos metales pueden competir con nutrientes esenciales, generando deficiencias metabólicas que incrementan el riesgo de efectos irreversibles, ya que permanecen en los tejidos sin posibilidad de degradación natural (Shah et al., 2024).

Las principales vías por las cuales los metales pesados ingresan a los sistemas hídricos incluyen el arrastre por escorrentía, la deposición atmosférica y el vertimiento de residuos industriales. Así, una vez presentes en el agua pueden infiltrarse en capas más profundas del ecosistema y llegar a napas subterráneas, donde pueden contaminar fuentes de agua utilizadas para consumo humano o agrícola. Por consiguiente, su presencia prolongada constituye un

riesgo continuo debido a su estabilidad química y movilidad ambiental, puesto que se acumulan progresivamente en diversas matrices acuáticas y terrestres (Li et al., 2020).

3.2.1. Ecosistema

Los metales pesados afectan la biodiversidad acuática debido a que degradan tanto la calidad del agua como la estructura de hábitats naturales. La presencia de estos metales interfiere en la reproducción y supervivencia de especies sensibles como peces y organismos bentónicos. Se ha observado también que estos contaminantes alteran el comportamiento y fisiología de algunas especies, lo que puede reducir la capacidad de adaptación biológica frente a cambios ambientales. Como consecuencia, los ecosistemas pierden estabilidad funcional y productividad natural, generando con ello desequilibrios en la cadena trófica y afectando su resiliencia ecológica (Li et al., 2020).

Asimismo, la toxicidad de los metales pesados en ecosistemas acuáticos depende de su biodisponibilidad, es decir, la fracción que puede ser absorbida por organismos vivos. En este contexto, factores como el pH y la composición del agua influyen en esta disponibilidad. Una vez absorbidos, los metales producen estrés oxidativo y daños celulares, cuyos efectos alteran la salud de peces, moluscos y otros organismos que forman parte esencial de la cadena trófica. Finalmente, estos daños comprometen procesos vitales como la respiración y reproducción acuática, afectando la continuidad ecológica de las poblaciones biológicas (Zhao et al., 2020).

El proceso de bioacumulación permite que los metales ingresen a la cadena alimentaria a través de organismos acuáticos contaminados. Cuando estos organismos son consumidos por depredadores, ocurre la biomagnificación, es decir, el aumento progresivo de concentraciones metálicas en niveles tróficos superiores, fenómeno que no solo afecta a la fauna acuática, sino también a aves y mamíferos que dependen de la misma. De esta manera, el impacto ecológico trasciende múltiples ecosistemas interconectados, dificultando la recuperación natural de los sistemas contaminados y extendiendo el daño ambiental a largo plazo (Aziz et al., 2023).

Finalmente, en ambientes de acuicultura también se han registrado altos niveles de contaminación por metales pesados, debido a la utilización de alimentos concentrados y fertilizantes que contienen trazas metálicas que generan eutrofización del agua al acumular nutrientes y contaminantes, disminuyendo el oxígeno disuelto necesario para los peces y otros organismos. Esto representa un riesgo ecológico productivo en sistemas de crianza acuícola que compromete la sostenibilidad económica de esta actividad (Li et al., 2020).

3.2.2. Sanitario

Los metales pesados ingresan al cuerpo humano al consumir agua o alimentos contaminados, así como por inhalación y contacto dérmico. Pueden acumularse en órganos vitales como el hígado, los riñones y el sistema nervioso central, y su eliminación es lenta debido a que son elementos no biodegradables. En consecuencia, estar expuestos a ellos de manera prolongada puede ocasionar efectos tóxicos de gravedad. Igualmente, debido a su carácter acumulativo y la dificultad de revertir sus efectos una vez instalados en el organismo, representa una amenaza constante para la salud pública (Rajendran et al., 2022).

Entre los principales efectos que ocasionan en la salud destacan problemas gastrointestinales, fatiga crónica, infecciones cutáneas y alteraciones pulmonares. En casos más graves pueden llegar a producir trastornos neurológicos y crecimientos malignos si la toxicidad es aguda o crónica, lo cual depende de la dosis y el tipo de metal. Considerando lo anterior, como algunos metales poseen efectos cancerígenos y teratogénicos, su impacto sanitario es motivo de preocupación en comunidades expuestas a ellos por largos periodos, ya que conlleva el deterioro progresivo de la calidad de vida (Yao et al., 2019).

En este contexto, se han registrado casos históricos que han evidenciado el impacto mortal de la contaminación por metales pesados. Uno de ellos ocurrió en Japón, donde la enfermedad de Minamata, producida por contaminación con metilmercurio en cuerpos de agua, afectó a miles de personas tras consumir pescado y mariscos contaminados. Entre los efectos se identificaron alteraciones sensoriales y daños cerebrales irreversibles, situación que impulsó

el establecimiento de regulaciones ambientales más estrictas a nivel mundial y reveló el riesgo del vertimiento industrial sin control (Aziz et al., 2023).

Otro caso grave fue la enfermedad itai-itai, originada en la cuenca del río Jinzu, Japón, por la ingestión de arroz contaminado con cadmio, producto de descargas mineras. Las personas afectadas desarrollaron dolor crónico, debilidad ósea y fallas renales. Tras años de investigación, el Gobierno japonés confirmó oficialmente que la causa del envenenamiento fue resultado de la contaminación ambiental. Este hecho, que se convirtió en un ejemplo dramático del riesgo asociado a la minería irresponsable, reflejó la vulnerabilidad de las poblaciones ubicadas cerca de zonas industriales sin regulación ambiental (Fung et al., 2018).

3.3. Técnicas de detección de metales pesados en sistemas hídricos

Conforme a Pavón et al. (2020), la creciente contaminación obliga a emplear métodos precisos para conocer con exactitud la concentración de metales en aguas próximas a áreas industriales, por cuanto estas abastecen a comunidades cercanas. Existen para ello técnicas como la absorción atómica, métodos fotométricos y electroquímicos, entre otras, mediante las cuales se puede evaluar de manera confiable la calidad del agua.

3.3.1. Espectrometría de absorción atómica

Es una de las técnicas más utilizadas, ya que posibilita atomizar las muestras por medio de la espectrometría por llama (FAAS), la atomización electrotérmica (ETAAS) y la generación de vapores químicos (CVG-AAS). La elección del método depende de factores como la composición, estado físico y concentración del analito. Sin embargo, a pesar de que la técnica por llama es la más empleada, su sensibilidad es menor frente a las otras opciones, lo que la hace menos adecuada para metales pesados presentes en bajas concentraciones.

La técnica electrotérmica, por su parte, permite analizar directamente muestras sólidas y ofrece mayor sensibilidad que la llama, pero requiere optimizar la temperatura y seleccionar modificadores químicos apropiados. A su vez,

la generación de vapores químicos destaca por su alta sensibilidad al formar hidruros que luego se atomizan; se enfoca en metales difíciles de cuantificar, como As, Sb, Se, Bi, Cd y Pb. En el caso del mercurio, se emplea el método de vapor frío, considerado uno de los más eficaces. Esto ocurre porque el mercurio es un elemento metálico cuya presión de vapor es bastante alta a temperaturas relativamente bajas y puede introducirse cuantitativamente en el espectrómetro como vapor sin dificultad.

3.3.2. Espectrometría de plasma de acoplamiento inductivo

Se considera una técnica combinada, ya que comúnmente se utiliza junto con otros métodos como la espectrometría de masas o la espectroscopía de emisión óptica, lo que hace posible un análisis más completo de los analitos. En este escenario, el plasma ioniza los componentes de la muestra sobre la llama, realizando la medición a distintas alturas según el analito, aunque el alto consumo de gas, usualmente argón, encarece significativamente su aplicación.

Esta técnica resulta igualmente valiosa para la determinación precisa de elementos, especialmente cuando se necesita acoplarlo con técnicas adicionales para mejorar la exactitud. Sin embargo, su costo operativo y el gasto de plasma lo hacen menos accesible para análisis rutinarios en comparación con otros métodos más sencillos, por lo que su uso se reserva generalmente para investigaciones especializadas o muestras con requerimientos analíticos complejos.

3.3.3. Técnicas fotométricas

Este tipo de técnica es una alternativa práctica y económica frente a la espectrometría de absorción atómica, la cual demanda un gasto considerable de tiempo y recursos, por lo que se recurre a métodos más simples y accesibles. Las técnicas fotométricas se utilizan comúnmente para la cuantificación de metales pesados en muestras de agua, ya que ofrecen una alternativa práctica y económica, manteniendo un nivel aceptable de confiabilidad en los resultados y facilitando la obtención de datos comparables en distintos contextos.

Por lo general, este procedimiento implica provocar una reacción entre los metales presentes y un agente fotométrico, como la ditizona, a fin de formar un complejo que posteriormente se analiza mediante un fotómetro a una longitud de onda específica, lo que permite controlar mejor las condiciones de medición. De esta manera, se puede estimar la concentración de un metal determinado en la muestra, convirtiendo esta metodología en una herramienta de enorme utilidad para monitoreos rutinarios o estudios preliminares de la calidad del agua, además de servir como base para tomar decisiones ambientales y de salud pública.

3.3.4. Técnicas electroquímicas

A lo largo del tiempo, se han desarrollado técnicas cada vez más sensibles para el análisis de metales pesados en niveles de trazas y ultratrazas, surgiendo recientemente un enfoque electroquímico que permite al investigador determinar estos elementos con mayor precisión y eficiencia. Dicho método combina un procedimiento electroquímico para el preenriquecimiento selectivo con un análisis espectroscópico, lo que posibilita obtener información cualitativa y cuantitativa sobre los contaminantes que están presentes en la muestra, optimizando los tiempos de análisis y reduciendo significativamente las interferencias.

Así, se han aplicado procedimientos como la electrodeposición o la electroadsorción, junto con técnicas como la absorción atómica, la espectrometría Raman de superficie mejorada o la fluorescencia de rayos X, entre otras, logrando incrementar la sensibilidad y precisión en la detección de metales, incluso en matrices complejas. Esta combinación metodológica facilita el estudio detallado de los contaminantes, ampliando las posibilidades de monitoreo ambiental y control de la calidad del agua, además de permitir una evaluación más confiable de los riesgos asociados a la presencia de metales pesados en distintos ecosistemas.

3.4. Métodos de tratamientos en la remoción de metales pesados en sistemas hídricos

De acuerdo con Pabón et al. (2020), aunque los contaminantes presentes en los afluentes pueden ser orgánicos o inorgánicos, no pueden tratarse de igual manera. Los métodos físicos, químicos y biológicos usados para contaminantes orgánicos no resultan tan eficaces para los metales pesados debido a propiedades como su solubilidad, comportamiento redox y formación de complejos, por lo que se han desarrollado estrategias específicas para su eliminación del medio acuoso. En ese contexto, dichas técnicas pueden ser convencionales y no convencionales.

3.4.1. Técnicas convencionales

Las técnicas convencionales surgieron como respuesta a la necesidad de tratar eficientemente los efluentes industriales para garantizar el cumplimiento de normas ambientales, las cuales emplean procesos físicos y químicos capaces de separar o transformar los metales pesados. En tal sentido, constituyen la base para el desarrollo de tecnologías más avanzadas y, además, continúan aplicándose por su eficacia y adaptabilidad a distintos escenarios de contaminación.

A. Filtración por membrana. Técnica de gran eficiencia, fácil operación y bajo requerimiento de espacio, aunque genera grandes volúmenes de lodos con metales. Las membranas se clasifican según su peso molecular de corte, material (sintético o polímero natural), permeabilidad, solubilidad del soluto y solvente, superficie, espesor activo y carga superficial. Esta tecnología se aplica en la recuperación de sales metálicas en galvanoplastia, reciclaje de aceites e industria de alimentos y bebidas.

a. Electrólisis. Técnica de descontaminación que permite remover iones de soluciones acuosas mediante membranas selectivas y la aplicación de un campo eléctrico constante. Estas membranas, dispuestas entre dos electrodos, permiten el paso de cationes o aniones según su carga eléctrica, los cuales al migrar quedan retenidos en las membranas de intercambio iónico correspon-

dientes. Este proceso es eficiente para la desalinización y el tratamiento de aguas industriales.

b. Ósmosis inversa. Técnica de separación por membranas que emplea una membrana semipermeable, con poros de entre 0.1 y 1.0 nm para separar por difusión controlada y basada en el principio de exclusión por tamaño y carga. Este proceso requiere aplicar una presión superior a la presión osmótica natural para forzar el paso del solvente a través de la membrana. Es ampliamente utilizado en la desalinización de agua, en el tratamiento de efluentes industriales y en la producción de agua de alta pureza.

c. Ultrafiltración. Técnica de separación selectiva que opera con presiones de hasta 10 bar, concentrando sólidos en suspensión y solutos con pesos moleculares superiores a 1000 uma. Eficiente en el tratamiento de aguas residuales debido a su bajo consumo energético y a las interacciones hidrofóbicas y electrostáticas entre la membrana y las partículas, lo que facilita la separación. Emplea agentes químicos y poliméricos, dando lugar a la denominada ultrafiltración mejorada con micelas.

d. Nanofiltración. Técnica de separación que opera a presiones de entre 10 y 50 bar y utiliza membranas que pueden retener especies neutras con pesos moleculares menores a 200-300 g/mol. Se considera un proceso intermedio entre la ósmosis inversa y la ultrafiltración, es de fácil operación, bajo consumo energético y menores presiones de trabajo. Su eficiencia depende de factores como el pH, la presión, la temperatura, la configuración del sistema y la susceptibilidad de la membrana al ensuciamiento.

B. Intercambio iónico. Técnica basada en el reemplazo de iones de igual carga, donde una matriz sólida, generalmente una resina, retiene los iones metálicos presentes en solución y libera otros iones a cambio. Es un proceso de separación física en el que los iones no sufren alteraciones químicas, que, en comparación con métodos como la coagulación, produce menos lodos, ofrece mayor selectividad y presenta una elevada eficiencia en la eliminación de iones metálicos en aguas contaminadas.

C. Adsorción. Técnica que permite eliminar diversos contaminantes de forma rápida y eficiente. Puede ser selectiva según el tipo de adsorbente, y su

rendimiento depende de la estructura física del material adsorbente. Es un proceso de transferencia de masa donde los contaminantes se adhieren a los sitios activos del adsorbente mediante interacciones físicas o químicas. Es un método de descontaminación sencillo, de bajo costo, flexible, que no genera subproductos tóxicos y permite la recuperación del adsorbente, lo que lo convierte en una alternativa ambientalmente favorable.

a. Carbón activado. Es uno de los adsorbentes más utilizados debido a su alta eficacia en la eliminación de contaminantes orgánicos e inorgánicos en medios acuosos. Esta eficiencia se debe a su gran área superficial porosa, que puede variar entre 500 y 1500 m²/g, y a la presencia de diversas superficies funcionales que permiten la interacción con distintos compuestos. Generalmente, se produce a partir de materiales carbonosos como biomasa, lignito o carbón, aunque también se exploran fuentes alternativas como el uso de la *Glebionis coronaria L.* para la remoción de iones metálicos.

b. Nanotubos de carbono. Han generado gran interés como nuevos adsorbentes debido a su gran capacidad para eliminar de aguas residuales contaminantes orgánicos, inorgánicos y radionúclidos de grandes volúmenes. Están compuestos por láminas cilíndricas de grafito enrolladas, que pueden ser de pared simple (SWCNT) o de paredes múltiples (MWCNT). Su eficacia se debe a mecanismos como la atracción electrostática, la sorción-precipitación y el intercambio iónico, además de sus excelentes propiedades mecánicas, químicas, magnéticas y a su estabilidad térmica.

D. Precipitación química. Técnica que consiste en añadir reactivos químicos que modifican el pH para formar precipitados metálicos, los cuales se separan por sedimentación, siendo especialmente eficaz para eliminar iones como Cu (II), Cd (II), Mn (II) y Zn (II). Entre los métodos más comunes se encuentran la precipitación por hidróxidos, de fácil control de pH, y la precipitación por sulfuros, que produce compuestos poco solubles. Es utilizada a nivel industrial por su sencillez, bajo costo y selectividad, aunque genera grandes cantidades de lodos que elevan los costos de mantenimiento.

a. Precipitación por hidróxidos. Técnica que consiste en ajustar el pH a valores alcalinos, lo que favorece la formación de hidróxidos metálicos inso-

lubles, e incluso hidróxidos dobles en el caso de iones trivalentes. Para ello, se emplean agentes precipitantes como el hidróxido de calcio o sodio, que facilitan la formación y separación de los precipitados metálicos. Es la técnica más utilizada para la eliminación de metales pesados debido a su simplicidad y bajo costo operativo.

b. Precipitación por sulfuros. Técnica altamente eficiente para la remoción de metales pesados, ya que los sulfuros metálicos presentan una solubilidad mucho menor que los hidróxidos en medios alcalinos. Emplea precipitantes como sulfuro de sodio (Na_2S), sulfuro de hierro (FeS) o sulfuro de hidrógeno (H_2S), destacándose por su rápida reacción, buena sedimentación y selectividad en la eliminación de metales. Sin embargo, en medios ácidos puede liberar gases tóxicos, por lo que se recomienda aplicar esta técnica en condiciones neutras o básicas.

E. Electrocoagulación. Técnica que emplea de forma combinada los principios de coagulación-floculación dentro de un reactor electrolítico equipado con una fuente de corriente y electrodos. Estos electrodos, por lo general de hierro o aluminio, liberan iones que desestabilizan las partículas coloidales presentes en el agua. De esta manera, reemplaza el empleo de coagulantes químicos tradicionales a través de la aplicación de corriente eléctrica.

3.4.2. Técnicas no convencionales

Las técnicas no convencionales surgieron como alternativas innovadoras frente a las limitaciones de los métodos tradicionales, especialmente cuando se requiere alta eficiencia y menor generación de residuos químicos. Estas tecnologías se caracterizan por aprovechar principios electroquímicos, fisicoquímicos y fotocatalíticos que permiten la remoción de contaminantes de forma más sostenible y selectiva. Su aplicación resulta especialmente valiosa en escenarios donde los efluentes contienen compuestos difíciles de tratar por métodos convencionales; no obstante, su implementación puede implicar mayores costos y requerimientos técnicos específicos.

A. Electroflotación. Técnica que consiste en la adición electrolítica de iones metálicos, donde los contaminantes son removidos eficientemente al ser arrastrados por burbujas de gas (H_2 y O_2) generadas en el sistema, permitiendo que floten hacia la superficie. El proceso ocurre en tres etapas: generación de burbujas de gas, adhesión de estas a las partículas suspendidas y formación de agregados partícula-burbuja. Este método es utilizado en el tratamiento de aguas, ya que combina oxidación electrolítica parcial y precipitación electroquímica o electrotérmica sin generar lodos químicos. Además, es fácil de operar y puede aplicarse a diversos tipos de contaminantes.

B. Flotación. Técnica que transforma los iones metálicos en especies hidrófobas mediante el uso de agentes tensoactivos o surfactantes, los cuales se adsorben sobre los iones metálicos formando complejos que repelen el agua. Posteriormente, se inyectan burbujas de aire en el medio, a las cuales se adhieren estas especies hidrófobas provocando que las burbujas suban hacia la superficie arrastrando consigo los contaminantes; ahí se forma una espuma o capa superficial que puede retirarse fácilmente. Este método es eficiente, rápido y requiere menor consumo de reactivos químicos en comparación con otros tratamientos convencionales.

C. Fotocatálisis. Técnica que se basa en la transferencia de carga producida entre un semiconductor y una solución acuosa contaminada. Así, cuando el semiconductor absorbe fotones, se genera un par electrón-hueco, lo que incrementa su conductividad con la temperatura y permite iniciar reacciones redox superficiales. Estos portadores de carga desencadenan reacciones que degradan los contaminantes, logrando con ello la eliminación eficiente y sostenible de metales pesados, compuestos orgánicos y colorantes presentes en el agua.

3.5. Casos de contaminación hídrica por metales pesados en América Latina

La contaminación por metales pesados en América Latina ha generado impactos significativos en ríos y comunidades, afectando la salud humana y los ecosistemas. Este contexto obliga a analizar casos concretos que evidencien la

magnitud del problema y las consecuencias de la actividad industrial, minera y urbana, a fin de promover la implementación de medidas de mitigación y restauración ambiental efectivas.

3.5.1. Contaminación del río Rímac (Perú)

El río Rímac, que abastece a la capital peruana, presenta niveles alarmantes de contaminación, pues se han detectado más de 240 millones de coliformes fecales termotolerantes junto con arsénico, hierro en exceso y otros 28 elementos peligrosos para la salud. Esta situación se agrava si se considera que las aguas muestran tonalidades anómalas (como marrón, rojo o negro) y espuma abundante, lo que refleja el impacto de vertidos industriales y domésticos (Infobae, 2025).

Organizaciones sociales y expertos advierten que en la cuenca alta del río se superan ampliamente los estándares ambientales para metales pesados como plomo, cadmio, arsénico y mercurio, ya que en los sedimentos se encontraron niveles hasta 203 veces por encima del límite permitido. Adicionalmente, se identificaron cientos de pasivos ambientales mineros, con 18 relaves muy próximos a cuerpos de agua y estructuras inestables en zona sísmica que incrementan los riesgos para las comunidades (CooperAcción, 2025).

La contaminación no solo afecta a las poblaciones de la sierra que viven directamente en la cuenca, sino también a Lima, que depende del recurso hídrico que provee el Rímac. Por esta razón, se requiere de una acción coordinada entre el Estado, la sociedad civil y las comunidades indígenas para proteger el agua, la salud y el medio ambiente. En respuesta, el gobierno ha declarado de interés nacional la restauración de la cuenca e impulsa un plan que incluye infraestructura, tratamiento de aguas residuales y recuperación ecológica, aunque enfrenta desafíos estructurales y de gobernanza (Infobae, 2025).

Es necesario, por lo tanto, intensificar la vigilancia ambiental, sancionar los vertidos ilegales y remediar los pasivos mineros, pues de lo contrario la degradación de las aguas del río Rímac no solo persistirá, sino que pondrá en riesgo a millones de personas en Lima y Callao. Asimismo, la sensibilización

ciudadana y la participación comunitaria emergen como piezas clave para garantizar que el derecho al agua potable y a un ambiente sano prevalezca frente a los intereses extractivos y urbanos (CooperAcción, 2025).

3.5.2. Contaminación del río Atrato (Colombia)

La cuenca del río Atrato enfrenta una grave crisis ambiental y de derechos humanos debido a la contaminación por mercurio proveniente de la minería ilegal de oro, ya que más de un tercio de la población local ha estado expuesta a niveles tóxicos que superan ampliamente los límites establecidos por la OMS. Esta situación ha generado daños neurológicos y trastornos del desarrollo, especialmente en mujeres durante el embarazo, y ha afectado gravemente a la fauna acuática, incluyendo delfines de río, peces y otras especies locales, provocando alarma entre organizaciones ambientales internacionales y especialistas en salud pública (ABC News, 2025).

Al respecto, la ONU ha calificado esta contaminación como una violación de los derechos humanos y ha instado al Gobierno colombiano a tomar medidas. Sin embargo, la implementación de la histórica sentencia de 2016, que reconoció al río Atrato como sujeto de derechos, ha sido insuficiente debido a la corrupción generalizada, la presencia de grupos armados ilegales y la falta de recursos financieros y técnicos. Además, la minería ilegal continúa siendo la principal fuente de contaminación, por lo que expertos advierten que, de no aplicarse soluciones concretas, los daños al río y a las comunidades locales se intensificarán en los próximos años (RTv Noticias, 2025).

Las comunidades indígenas y afrodescendientes que habitan en la cuenca dependen del agua para su subsistencia, ya que les permite desarrollar actividades económicas tradicionales como la pesca y la agricultura, entre otras. No obstante, la contaminación por mercurio ha alterado profundamente su vida cotidiana, provocando incluso desplazamientos forzados. Asimismo, se han reportado casos de trabajo forzado y prostitución vinculados a la minería ilegal, lo que aumenta la vulnerabilidad de estas poblaciones y profundiza las desigualdades históricas, poniendo en grave riesgo la supervivencia cultural, social y económica de los pueblos que habitan en la zona (ABC News, 2025).

En este escenario, la ONU ha solicitado al Gobierno colombiano implementar acciones efectivas y sostenibles para frenar la minería ilegal, limpiar los sitios contaminados y proporcionar atención médica integral a las comunidades afectadas. Asimismo, ha instado a Colombia a cumplir con compromisos internacionales como la Convención de Minamata sobre el mercurio y otros tratados ambientales. Pese a ello, no ha habido respuesta gubernamental, lo que ha generado preocupación entre organismos internacionales, comunidades locales y expertos, y ha puesto de manifiesto la urgente necesidad de una efectiva cooperación interinstitucional para lograr la recuperación del río Atrato (RTv Noticias, 2025).

3.5.3. Contaminación del río Atoyac (México)

La cuenca del río Atoyac, ubicada en los estados de Puebla y Tlaxcala, enfrenta una grave crisis ambiental. Desde la década de 1960, la región ha sido un centro industrial que alberga a distintas multinacionales (especialmente alemanas, como Volkswagen, Bayer y BASF), las cuales han influido significativamente en la contaminación del río al verter en él aguas residuales sin el tratamiento adecuado, disminuyendo drásticamente la calidad del agua y afectando la salud de las comunidades locales. En este contexto, se estima que las tasas de mortalidad por enfermedades renales crónicas en personas de 15 a 49 años son casi cinco veces superiores al promedio nacional (The Guardian, 2025).

La contaminación también proviene, aparte de las industrias, de fuentes domésticas y agrícolas, cuyas aguas residuales sin tratar (de hogares y cultivos) se vierten directamente al río, exacerbando el problema. La situación se agrava por la falta de infraestructura adecuada para el tratamiento de aguas residuales, ya que muchos municipios carecen de plantas de tratamiento eficientes. Tal situación provoca daños graves en la salud de la población local, donde la combinación de estos factores ha convertido al Atoyac en un río altamente contaminado, con niveles de metales pesados y compuestos tóxicos que superan los límites permitidos (Inecol, 2025).

Como resultado, la contaminación del Atoyac ha traído consecuencias devastadoras para la biodiversidad local, pues las especies acuáticas han desaparecido debido a la toxicidad del agua y los ecosistemas circundantes se han deteriorado. Al respecto, la comunidad ha denunciado la presencia de espuma tóxica en el río que emite olores nauseabundos y causa mareos y vómitos en las personas, y cuyos animales sufren afectaciones permanentes, lo que ha generado un ambiente insostenible para la vida humana y silvestre (The Guardian, 2025).

El Gobierno mexicano ha reconocido la gravedad del problema, razón por la que la presidenta ha incluido la limpieza de dicho río entre las 100 prioridades de su administración. La implementación de medidas efectivas enfrenta, no obstante, desafíos significativos, como la falta de voluntad política, la corrupción y la resistencia de las empresas responsables, pese a que algunas acciones de limpieza y vigilancia ambiental progresan lentamente. Aun así, y pese a las inspecciones y sanciones impuestas, los avances son limitados y la contaminación persiste, manteniendo en riesgo la salud y el bienestar de las comunidades que dependen del río (Inecol, 2025).

CAPÍTULO IV

CONTAMINACIÓN DE SISTEMAS HÍDRICOS POR METALES PESADOS: UNA REVISIÓN EN CONTEXTOS LATINOAMERICANOS

La contaminación ambiental se ha convertido en un tema crítico de relevancia mundial. Este proceso, que acarrea innumerables consecuencias negativas, comenzó con la Revolución Industrial, pero en las últimas décadas, con el desarrollo descontrolado de múltiples actividades humanas como la urbanización, el transporte, la industria y la agricultura, se ha incrementado a niveles alarmantes. En este contexto, las poblaciones más vulnerables a la contaminación tóxica resultante de los procesos industriales pertenecen a países en desarrollo (Aroh, 2018; Ferronato & Torretta, 2019; Ngwenya et al., 2024).

Los ecosistemas acuáticos de todo el mundo se encuentran entre los sistemas naturales más afectados. Diferentes contaminantes se introducen de forma continua en el medio acuático, tanto en lagos, ríos y estanques como en mares y océanos. Esto se debe principalmente al crecimiento de la población humana, a la industrialización, al avance de la tecnología y a la explotación de recursos naturales, así como a la escorrentía de desechos agrícolas y domésticos (Iruoghene et al., 2024; Sankhla et al., 2016; Sarker et al., 2021).

Entre los muchos contaminantes convencionales del agua se encuentran los insecticidas, pesticidas, fertilizantes, antibióticos, fármacos, microorganismos patógenos (desechos fecales), compuestos de origen orgánico (petróleo, gasolina, plásticos, disolventes, detergentes) y sustancias radiactivas. Sin embargo, a partir de las décadas de 1990 y del 2000 comienza a utilizarse y a estudiarse otro tipo de contaminantes, denominados “contaminantes de preocupación emergente” (Nishmitha et al., 2025). Estos incluyen algunos que no se encuentran regulados y que pueden representar importantes peligros ambientales o para la salud. Ejemplo de ello son los productos farmacéuticos y de cuidado personal, subproductos de desinfección, contaminantes orgánicos

persistentes y metales pesados (MP) como el mercurio. Su presencia ha sido detectada en aguas subterráneas, superficiales y otras fuentes de agua potable (Figura 1).

Figura 1. *Contaminantes emergentes*



Nota. Tomado de Nishmitha et al. (2025)

La presente revisión se centrará en examinar la literatura en torno a la acción contaminante que tienen los MP sobre los sistemas hídricos. Estos contaminantes se encuentran entre los grupos más peligrosos debido a su toxicidad, persistencia, capacidad de acumularse en los organismos y amplificarse en la cadena alimentaria, y, aún más, a su naturaleza no degradable. Las investigaciones sobre la contaminación del agua por MP no son nada nuevas. En el año 1997, Cynthia R. Evanko y David A. Dzombak, entre muchos otros, lograron establecer que es un problema persistente en muchos sitios contaminados. En Estados Unidos, los metales pesados con mayor presencia en áreas contaminadas son estos: arsénico, plomo, cadmio, cromo, zinc, cobre y mercurio. Cuando las aguas subterráneas y suelos presentan alguno de ellos, se convierten en una importante amenaza tanto para los sistemas ecológicos como para la salud humana.

Un aspecto importante y característico de los metales pesados es que no se degradan, en comparación con los contaminantes orgánicos, los cuales se descomponen en otras sustancias químicas con el tiempo. Los metales pesados poseen efectos tóxicos incluso en bajas concentraciones, pues pese a ello pueden generar alteraciones en todos los procesos bioquímicos y/o fisiológicos de los organismos; más aún, pueden ser letales para el ser humano o cualquier ser vivo (Bishnu et al., 2024; Calderón-Guevara et al., 2023; Londoño-Franco et al., 2016).

Estos contaminantes son bastante comunes y pueden encontrarse en el agua potable de todos los continentes. El estudio realizado por Li et al. (2019) analizó las tendencias y los riesgos para la salud, e identificó las fuentes de ocho especies de MP disueltos en lagos y ríos de Asia, África, América del Norte, Europa y América del Sur durante el periodo 1970-2017 (Oceanía fue excluida debido a la falta de datos). De ese modo, se logró establecer que las fuentes de metales pesados variaron de acuerdo al continente. Así, el vertido de residuos y la meteorización de rocas predominaron en África; la minería y la industria manufacturera, junto con la meteorización de rocas, predominaron en Asia y América del Sur.

Por otra parte, el uso de fertilizantes y pesticidas –junto con la meteorización de rocas predominaron en América del Norte, mientras que la minería y la industria manufacturera, el vertido de residuos y la meteorización de rocas prevalecieron en Europa. Este continente, no obstante, ha controlado exitosamente la contaminación por MP gracias a la implementación de estándares rigurosos para las emisiones de metales, la limitación de las concentraciones de metales en los productos y el tratamiento riguroso de los residuos contaminados con metales. Sin embargo, resulta necesario seguir monitoreando la realidad que hoy presentan estos continentes y, en especial, América del Sur.

Considerando lo abordado hasta este punto, el presente trabajo investigativo se plantea realizar una revisión sistemática de la literatura, cuyo propósito principal es conocer el estado actual de la literatura referida a la contaminación de sistemas hídricos por MP en Latinoamérica. En tal sentido, se plantean dos preguntas de investigación: ¿Cómo ha sido la evolución de la literatura sobre la contaminación de sistemas hídricos por MP en Latinoamérica? Esto en cuanto a año de publicación del estudio, autores, año e idioma

de publicación, nombre de la revista y bases de datos en la cual se encuentra indexada, metodología de la investigación y principales hallazgos. Asimismo, ¿cuáles son las características más resaltantes de la contaminación por metales pesados en los sistemas hídricos en Latinoamérica?

4.1. Metodología

Se ejecutó una revisión sistemática de la literatura a partir de las directrices PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), con la finalidad de garantizar una metodología rigurosa y transparente (Page et al., 2021). La búsqueda bibliográfica estuvo enfocada en cuatro bases de datos principales: Latindex, Web of Science, Scopus y SciELO. Dos de los autores se encargaron de seleccionar los estudios y revisar todo el proceso para mantener la integridad del estudio. La estrategia de búsqueda incluyó los siguientes componentes: palabras clave, criterios de inclusión y exclusión y operadores booleanos para refinar los resultados de la búsqueda. Este proceso se realizó utilizando estas palabras clave: contaminación, “sistemas hídricos”, “metales pesados” y Latinoamérica. El análisis realizado abarcó estudios aceptados hasta el 10 de agosto de 2025.

Criterios de selección y elegibilidad

Se definieron algunos criterios de inclusión y exclusión que se aplicaron en la escogencia y calificación de los artículos. Estos fueron los siguientes:

- Estudios publicados como artículos originales (no capítulos de libros, *papers* de congresos ni tesis)
- Estudios publicados solo en inglés y en español
- Documentos publicados entre 2015 y 2025
- Estudios sobre contaminación del agua por metales pesados
- Ser de acceso abierto

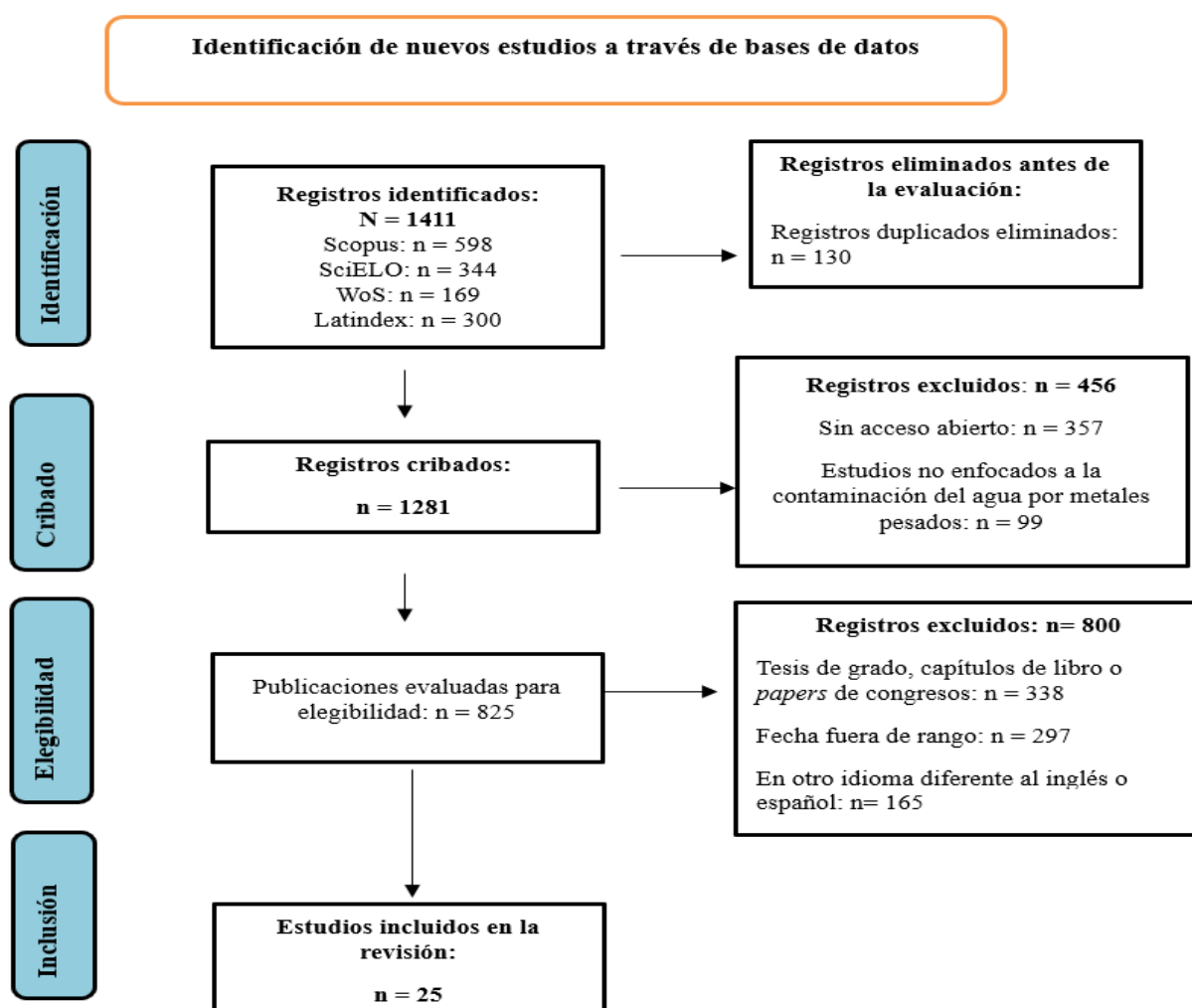
Una vez definidos los criterios, dos revisores independientes realizaron una revisión doble ciego de las secciones Título, Resumen y Palabras clave. El uso del método PRISMA facilitó la descarga de información bibliográfica de la totalidad de los artículos recuperados. De inmediato, los artículos duplicados se eliminaron y se aplicaron los criterios de inclusión establecidos. Posteriormente, los estudios seleccionados se revisaron de forma cuidadosa en texto

completo para extraer la información necesaria de cada uno de ellos, la cual se ingresó en un archivo de Excel. Este archivo contenía información de cada uno de los estudios revisados. A saber, nombre de los autores, país, revistas, bases de datos, metodología, idioma de publicación y hallazgos más relevantes.

4.2. Resultados

La búsqueda arrojó 1411 registros en las cuatro bases de datos, de los cuales fueron eliminados 130 por encontrarse duplicados. Los registros cribados que pasaron a la siguiente fase fueron 1281, los que fueron sometidos a revisión del título, del resumen y del texto completo. Finalmente, se logró establecer que 25 registros cumplieron con los criterios de inclusión establecidos. El proceso de selección se observa en el diagrama de flujo PRISMA (Figura 2).

Figura 2. Método PRISMA

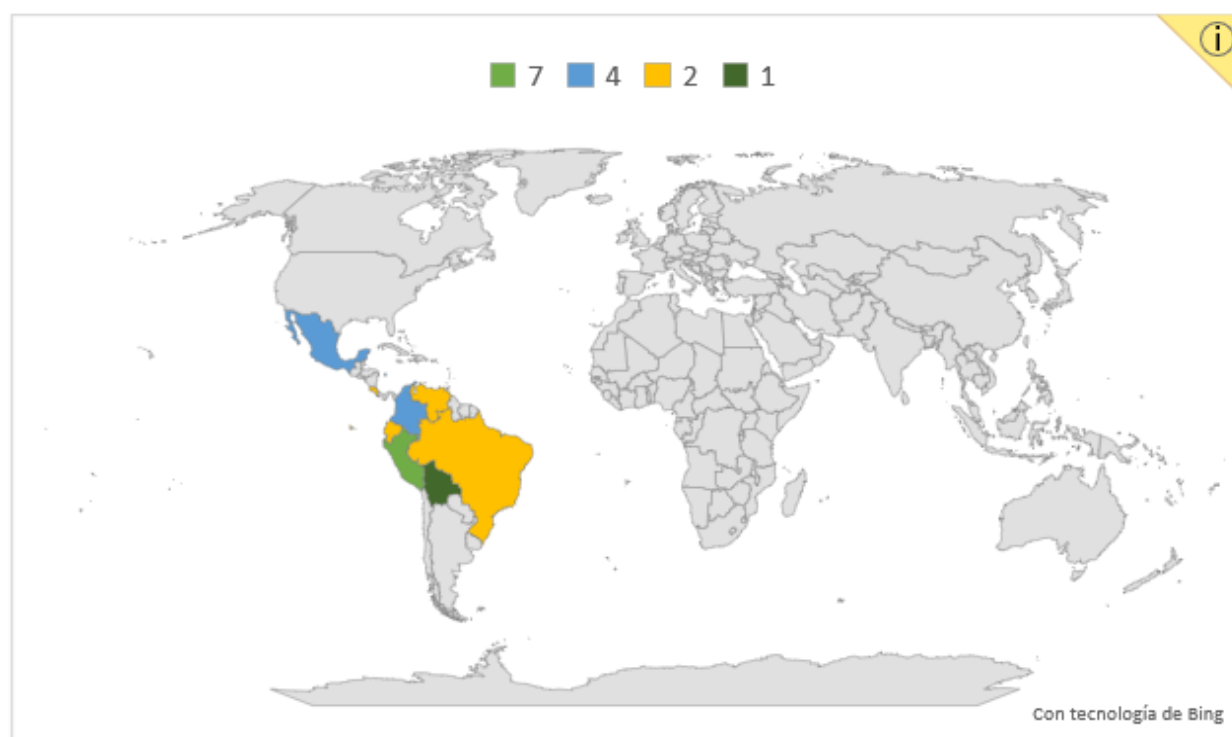


Nota. Elaboración propia

Descripción general de los estudios revisados

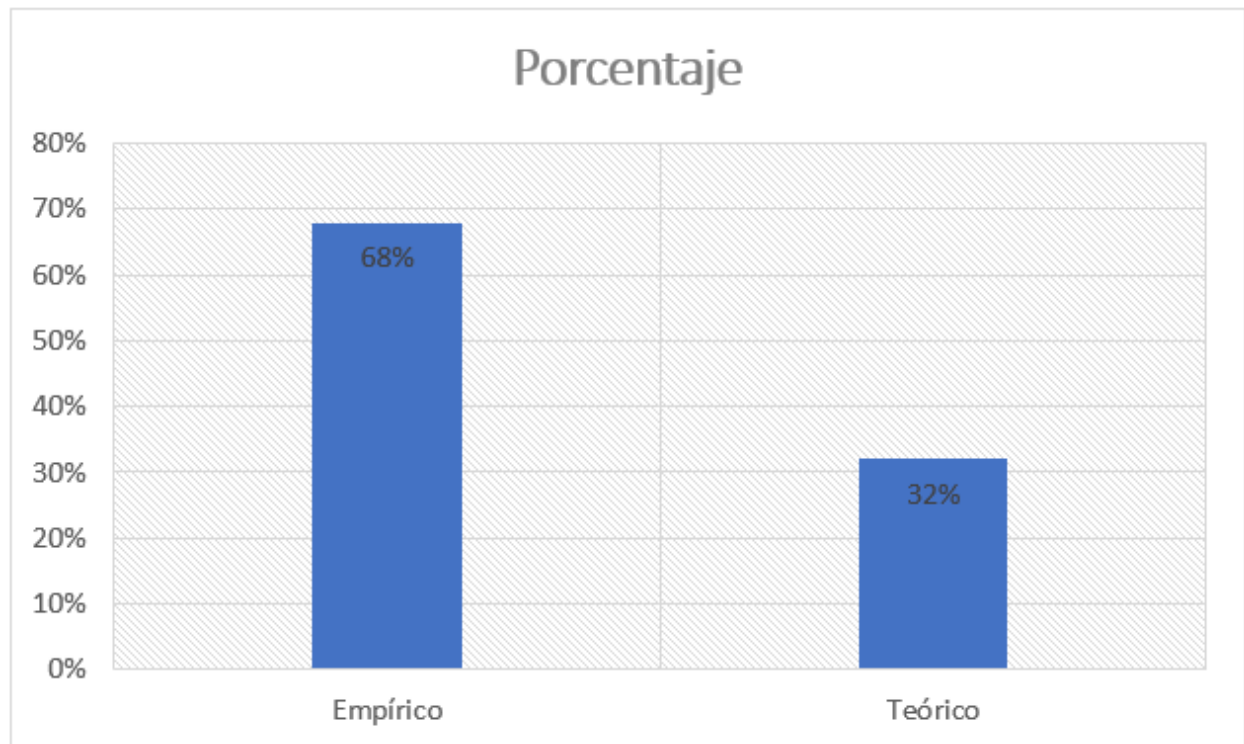
Gran parte de los 25 artículos fueron escritos por autores peruanos ($n=7.28\%$). Cuatro artículos se elaboraron en Colombia, tres en México, dos en Costa Rica, Ecuador y Venezuela, mientras que tan solo un estudio fue realizado en Bolivia, otro abarcó la región costera del Caribe y otro incluyó 20 países latinoamericanos (Figura 3).

Figura 3. Países con mayor producción científica



Nota. Elaboración propia

Asimismo, 68 % de los artículos fueron empíricos y el 32 % teóricos. Dentro del trabajo empírico, la mayoría de los artículos (67 %) utilizaron métodos cuantitativos (Figura 4).

Figura 4. *Tipo de metodología predominante en los estudios*

Nota. Elaboración propia

La Tabla 1 muestra las características más resaltantes de los 25 estudios examinados; estas se encuentran referidas a: Autor(s), país, metodología utilizada en el estudio, nombre de la revista, idioma de publicación y base de datos en la cual se encuentra indexada la revista.

Tabla 1. *Datos más importantes de los estudios examinados*

Autor(es) / País	Metodología	Revista	Idioma	Base de datos
Aranguren-Díaz et al. (2024). Colombia	Revisión	Water	Inglés	Scopus/WoS
Cadavid-Velásquez et al. (2019). Colombia	Cuantitativa	Gestión y Ambiente	Español	Latindex
Bermúdez-Kuminev et al. (2025). Costa Rica	Cuantitativa: estudio exploratorio	Revista Geográfica de América Central	Español	SciELO/Latindex
Ruiz et al. (2025). México	Revisión	Revista Internacional de Contaminación Ambiental	Inglés	SciELO
Hernández-Rodríguez et al. (2021). Colombia	Revisión sistemática	Ingeniería y Universidad	Inglés	Scopus/Latindex
Capela et al. (2024). Brasil	Revisión	Revista de Gestão Social e Ambiental	Inglés	Scopus/Latindex

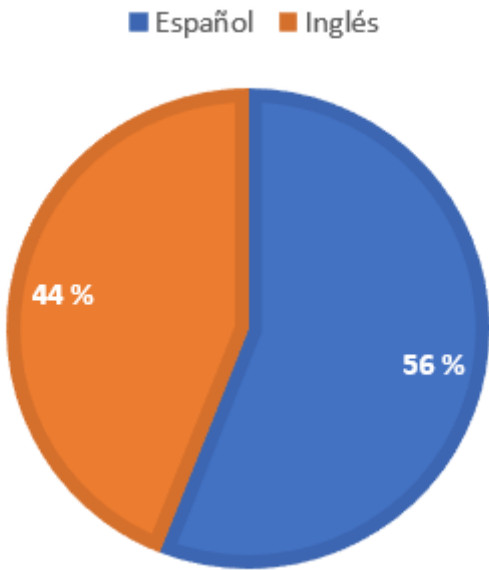
Mamani et al. (2025). Perú	Revisión sistémica	Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales	Español	SciELO
Ramírez-Cota et al. (2025). México	Revisión sistemática	Journal of Water and Health	Inglés	Scopus
Mancilla-Villa et al. (2023). México	Cuantitativa	Terra Latinoamericana	Español	SciELO/Latindex
Custodio et al. (2021). Perú	Cuantitativa	Water	Inglés	Scopus/WoS
Bundschuh et al. (2021). 20 países latinoamericanos	Revisión	Critical Reviews in Environmental Science and Technology	Inglés	Scopus
Carvalho et al. (2020). Brasil	Cuantitativa	Latin American Journal of Aquatic Research-LAJAR	Inglés	Scopus/WoS/SciELO
Quispe et al. (2019). Perú	Cuantitativa: experimental	Revista Boliviana de Química	Español	SciELO
Peñafiel et al. (2017). Ecuador	Cuantitativa	Polo del Conocimiento	Español	Latindex
Centeno et al. (2025). Venezuela	Cuantitativa	Revista Ciencias Marinas y Costeras	Español	Scopus/Latindex
González et al. (2018). Ecuador	Cuantitativa	Rev. del Instituto de Investigación FIGMM-G-UNMSM	Español	Latindex
Fuentes et al. (2019). Venezuela	Cuantitativa	Revista Internacional de Contaminación Ambiental	Español	Scopus/WoS/SciELO
González y Murga (2020). Perú	Cuantitativa	Revista Iberoamericana Ambiente & Sustentabilidad	Español	Latindex
Alfaro-Sandí et al. (2021). Costa Rica	Cuantitativa	Revista Tecnología en Marcha	Español	WoS/SciELO
Sánchez-Castillo et al. (2024). Perú	Enfoque aplicativo y diseño experimental correlacional	C&T Riqchary Revista de Investigación en Ciencia y Tecnología	Español	Latindex
Peralta (2024). México	Estudio de caso	Carta Económica Regional	Español	SciELO/Latindex

Fajardo et al. (2017). Perú	Cuantitativa	Rev. del Instituto de Investigación FIGMMG-UNMSM	Español	Latindex
Alvizuri-Tintaya et al. (2022). Bolivia	Cuantitativa: ex- perimental	Water	Inglés	Scopus/WoS
Salas-Mercado et al. (2023). Perú	Cuantitativa	Pollution	Inglés	Scopus/WoS
Fuentes-Gándara et al. (2021). Colombia	Cuantitativa	Marine Pollution Bul- letin	Inglés	Scopus

Nota. Elaboración propia

En relación con el idioma de los estudios referidos a la contaminación de sistemas hídricos por metales pesados, destaca el español con 14 publicaciones, lo que representa 56 % del total de investigaciones examinadas. Le sigue el inglés con 11 estudios publicados (44 %). Se debe destacar que estas cifras obedecen principalmente a que el ámbito de estudio fue Latinoamérica (Figura 5).

Figura 5. Idiomas de publicación

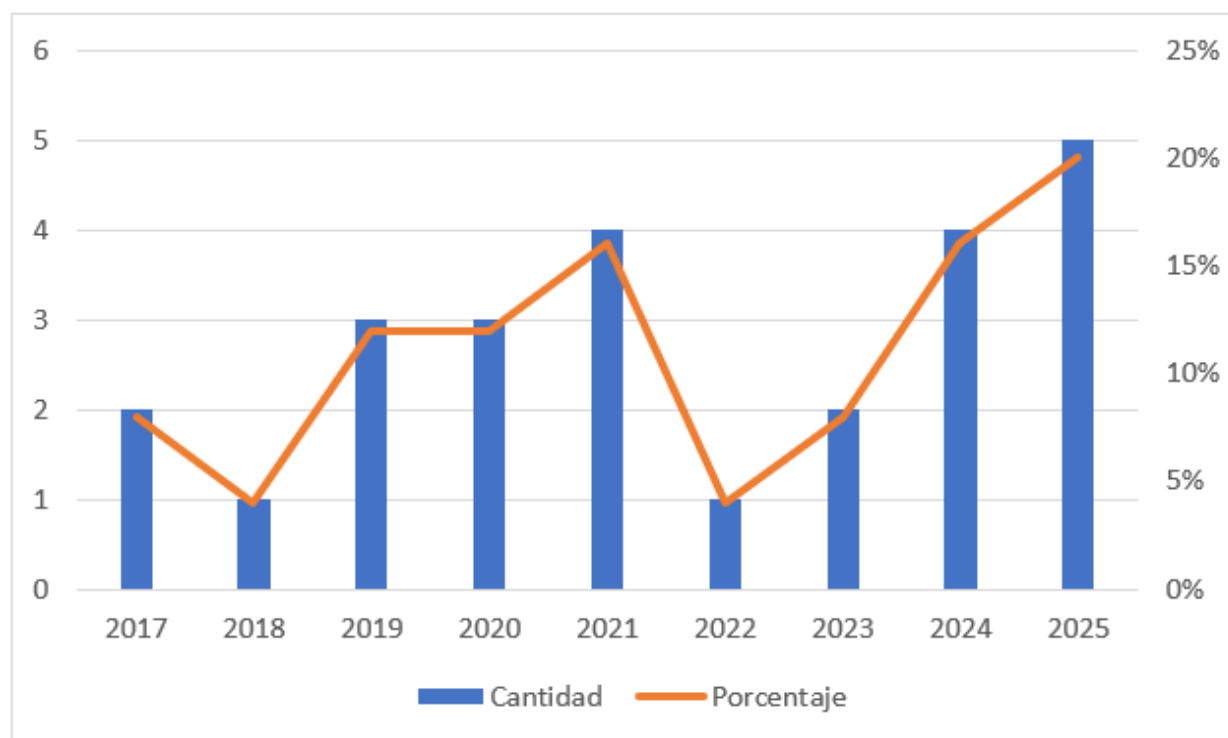


Nota. Elaboración propia

Por otra parte, el año con mayor número de publicaciones fue el 2025 (n=5), seguido del 2024 y 2021 con 4 c/u, 2020 y 2019 con 3, 2017 y 2023 con 2 y, finalmente, los años 2018 y 2022 con 1 estudio c/u (Figura 6). Estas cifras evidencian que en los dos últimos años (2024 y 2025) la comunidad científica ha experimentado un gran interés por la contaminación de los sis-

temas hídricos en Latinoamérica. Como resultado, se ha producido una cantidad importante de estudios relacionados con la acción que los MP tienen en los recursos hídricos de la región.

Figura 6. *Producción científica por año*



Nota. Elaboración propia

Latindex fue la base de datos que presentó una cantidad superior de estudios publicados en revistas indexadas (6 = 24 %), seguida de Scopus (3 = 12 %) y SciELO (3 = 12 %). En este punto destaca la publicación de estudios referidos a la contaminación de sistemas hídricos por MP en revistas con una doble y hasta una triple indexación; muestra de ello la constituyen 4 publicaciones en revistas pertenecientes a Scopus y WoS. Asimismo, se encontraron revistas indexadas, tanto en SciELO como en Latindex, con 3 trabajos investigativos; lo mismo se observó en revistas indexadas en Scopus y Latindex con 3 estudios, y WoS/SciELO con 1 publicación. Por último, resalta la presencia de una revista cuya indexación se encuentra en tres bases de datos (Scopus/WoS/SciELO) con 2 estudios publicados.

4.3. Discusión

La revisión sistemática ejecutada sobre la contaminación de sistemas hídricos por metales pesados en Latinoamérica reveló importantes hallazgos, destacando las características más resaltantes de dicha contaminación. Seguidamente, se profundiza en estos aspectos y en los últimos reportes de los estudios en cuanto a la realidad que experimentan algunos países latinoamericanos, así como estrategias adoptadas para mitigar sus efectos.

Uno de los grandes problemas que experimenta el mundo en la actualidad es la contaminación ambiental. En este sentido, los metales pesados representan un grupo de elementos bastante nocivos para la salud de los seres humanos, así como para los animales y la vida en general. El cadmio, el arsénico, el plomo y el mercurio son algunos de los que tienen mayor impacto. Tanto metales como metaloides en los suelos, el aire y el agua son capaces de afectar la salud pública y la seguridad alimentaria en todo el mundo. Esta situación se origina porque existen fuentes de contaminación de origen antropogénico, es decir actividades que favorecen la acumulación de metales pesados en el ambiente (Mamani et al., 2025).

Para Ramírez-Cota et al. (2025) los MP se reconocen como contaminantes que provienen de la corteza terrestre y se distribuyen en el medio ambiente. A diferencia de otros elementos metálicos, los metales pesados se caracterizan por ser densamente altos ($>4 \text{ g/cm}^3$) y tóxicos incluso en pequeñas concentraciones. Los autores explican que son capaces de reemplazar al grupo funcional $-\text{OH}$ en las enzimas alterando las funciones metabólicas, lo que generalmente provoca la inactivación enzimática, la supresión de las defensas antioxidantes y la generación de especies reactivas de oxígeno en las células. Todo este proceso generado en cualquier ser vivo da como resultado un estrés oxidativo y acarrea problemas de salud, como trastornos congénitos, enfermedades inmunológicas y formación y progresión de tumores.

En Colombia, Aranguren-Díaz et al. (2024) consiguieron establecer que los metales potencialmente dañinos en el agua subterránea pueden tener origen geogénico. Su presencia se debe, principalmente, a diferentes factores, como la

litología, las condiciones hidrodinámicas, la mineralización de las cuencas hidrográficas y las interacciones agua-roca, incluyendo la disolución mineral, el intercambio iónico y los procesos redox. No obstante, las actividades humanas también pueden favorecer que estos metales aparezcan en el agua subterránea, ya sea como consecuencia de procesos industriales, prácticas agrícolas u otras fuentes de origen antropogénico.

Los estudios realizados demuestran que las aguas subterráneas pueden contener más de 200 contaminantes orgánicos, como pesticidas, productos veterinarios, aditivos alimentarios, nanomateriales, compuestos industriales, disolventes halogenados, productos de cuidado personal y residuos farmacéuticos. Estos últimos han llamado la atención debido a su elevada persistencia en el medio ambiente. También se llevó a cabo una comparación entre los metales primarios (selenio [Se], zinc [Zn], hierro [Fe], cobre [Cu] y níquel [Ni]) y los metales no esenciales o metales pesados (mercurio [Hg], cromo [Cr], cadmio [Cd], manganeso [Mn], plomo [Pb] y arsénico [As]). La exposición a altas concentraciones de estos últimos supone un importante riesgo para la salud de las personas. En un estudio realizado por Aranguren-Díaz et al. (2024), centrado en aguas subterráneas de Colombia, se logró establecer que las características físico-químicas de las aguas subterráneas, propias de la geología local, varían en cuanto a su pH, temperatura, turbidez, contenido iónico y niveles de metales y minerales. Los elementos nocivos que presentan estas aguas pueden tener origen biogénico, geogénico y antropogénico; es decir, deberse a elevadas concentraciones de sales, metales pesados y contaminantes químicos. Estos factores son determinantes para evaluar su calidad y uso.

Uno de los primeros estudios identificados en esta revisión fue el de Peña-fiel et al. (2017), cuyo objetivo consistió en evaluar la calidad físico-química del agua y de los sedimentos en el sistema estuarino Estero Salado de Ecuador. En este país, los manglares representan una diversidad de hábitats que ocupan cerca de 2900 km de zona costera, constituyéndose en uno de los ecosistemas más importantes del Estero Salado. El estudio realizado logró demostrar que este sistema estaba siendo afectado por las actividades antropogénicas realizadas en las grandes ciudades y en sus alrededores. Muchas de ellas se rela-

cionaban con el crecimiento poblacional en las riberas del Estero, los residuos sólidos y el desarrollo industrial. La comparación de los resultados, efectuada tanto en invierno como en verano, evidenció que gran parte de los parámetros se encontraban por encima de los límites máximos considerados en la normativa ambiental del país, por lo que recomendaban la aplicación de un sistema de gestión que pudiese corregir esta situación.

En el Perú, Custodio et al. (2021) estudiaron los humedales naturales de la región central del país y lograron establecer que las concentraciones promedio de metales en los sedimentos de las lagunas Paca y Tragadero para ese momento disminuyeron en el orden $Fe > Zn > Pb > As$. En este caso en especial, los análisis del índice de contaminación identificaron a As y Pb como los elementos que más contribuían a la degradación ambiental de los ecosistemas por actividades antropogénicas. Los valores correspondientes al grado de contaminación modificado y al riesgo ecológico potencial muestran que la laguna Paca se encontraba en un grado moderado de contaminación y riesgo ecológico potencial, mientras que la laguna Tragadero presentaba un elevado nivel de contaminación y considerable riesgo ecológico potencial. Entre las causas se encuentran las actividades urbanas asociadas a la agricultura, responsables de la mayor acumulación de metales en esta zona.

Bundschuh et al. (2021) hicieron otro estudio, que abarcó a 20 países de Latinoamérica, en el que recopilaron, compilaron y analizaron información sobre la incidencia y los impactos de la exposición al arsénico (As) en dicha región. Ahí se observó que el As afecta los sistemas hídricos y el medio ambiente, exponiendo a los seres humanos a un riesgo significativo. El arsénico proviene de diferentes fuentes, principalmente geogénicas y antropogénicas locales, desde donde se moviliza a entornos como las aguas subterráneas y superficiales, suelos, sedimentos y biota.

En México, Mancilla-Villa et al. (2023) estudiaron la cuenca del río Ayuquila-Armería con el fin de establecer cuál era el nivel de concentración de MP (Cr, As, Hg, Cd, Pb y Zn) en el agua y en macroinvertebrados acuáticos. Identificaron la presencia de Cd, Hg, Cr, Pb, Zn y del metaloide As; asimismo, detectaron bioacumulación de metales. Destacaron igualmente la presencia de

mercurio y plomo que superaba los límites máximos permitidos. De igual manera, se detectaron los metales mencionados en las muestras de macroinvertebrados, cuyas concentraciones también excedieron los límites máximos.

Por su lado, Centeno et al. (2025) se plantearon como objetivo determinar el índice de riesgo ecológico por metales pesados en el Parque Nacional Morrocoy (PNM), ubicado en Venezuela. Los resultados alcanzados demostraron que los valores obtenidos de los parámetros de salinidad, pH y conductividad fueron normales. Con relación a la presencia de MP en los sedimentos intermareales del parque, se encontró que sus concentraciones seguían esta secuencia: $\text{Fe} > \text{Mn} > \text{Cr} > \text{Ni} > \text{Cu} > \text{Pb} > \text{Cd}$; este último mostró la mayor concentración respecto a su abundancia natural en la corteza terrestre. Un aspecto destacable fue que la probabilidad tóxica conjunta de los metales era bastante baja. El índice de carga contaminante proyectó valores inferiores a las estimaciones que indican contaminación. En el caso de los elementos $\text{Cu} > \text{Cr} > \text{Pb}$, presentaron bajo riesgo ecológico potencial en los diferentes puntos donde fue tomada la muestra. Mientras que el índice de riesgo ecológico potencial evidenció bajo riesgo (no existe contaminación) para algunos de sus islotes; por ejemplo, cayo Borracho y cayo Sal (Centeno et al., 2025).

Los estudios realizados plantean buscar estrategias y mecanismos que permitan monitorear las concentraciones de MP de una manera más eficaz y así lograr identificar el riesgo para la salud pública en algunas áreas (Alvizuri-Tintaya et al., 2022). Por su parte, Aranguren-Díaz et al. (2024) recomiendan realizar más estudios vinculados con estrategias de recuperación y gestión de acuíferos y aguas subterráneas. Ruiz et al. (2025) en su estudio realizado en México, agregan que es necesario formular estrategias para mitigar la contaminación, estas estrategias deben ser coordinadas por los países involucrados. Este estudio realizado en la región costera del Caribe señala la necesidad de formular e implementar políticas ambientales nacionales e internacionales para enfrentar los contaminantes presentes y que contribuyan de manera importante a la conservación de la biodiversidad marina.

Finalmente, otra de las estrategias planteadas por los autores consiste en el uso de hongos macromicetos presentes en zonas costeras de Colombia, los

cuales han sido poco estudiados. El trabajo investigativo de Cadavid-Velásquez et al. (2019) logró demostrar que estos hongos pueden constituirse en herramientas bioindicadoras debido a su capacidad bioacumuladora, lo que supone una excelente estrategia de biorremediación.

4.4. Conclusiones

La contaminación de los sistemas hídricos representa en la actualidad una situación sumamente preocupante para la comunidad científica a nivel mundial, ya que se presenta en numerosos países latinoamericanos y en otras regiones del mundo. La revisión realizada puso de manifiesto que existen sedimentos con niveles de contaminación relevantes en las zonas de influencia de ríos, mares y cuencas que son importantes para las ciudades y poblados de Latinoamérica. En algunos casos se observan grandes concentraciones de Cu, Cr y Ni, por lo general como resultado de diversas actividades antrópicas.

Asimismo, la revisión señala la significativa y compleja dinámica de la contaminación por MP en los sistemas hídricos latinoamericanos, destacando los considerables riesgos para la biodiversidad, la funcionalidad ecosistémica y la salud humana. Este tipo de contaminación por MP, especialmente la que se origina por actividades industriales, fabricación de productos químicos, fuentes naturales y uso doméstico, constituye una preocupación significativa para la protección y sostenibilidad del medio ambiente. Las investigaciones futuras deben orientarse a la búsqueda de métodos de monitoreo continuo que aseguren el control de las fuentes de agua más vulnerables a la contaminación por MP, con el propósito de impedir desastres ecológicos y de salud pública.

CAPÍTULO V

RETOS Y OPORTUNIDADES PARA LA SOSTENIBILIDAD DE LOS RECURSOS HÍDRICOS: PERSPECTIVAS FUTURAS

La sostenibilidad de los recursos hídricos se ha convertido en un tema central debido a la creciente presión sobre la disponibilidad y calidad del agua en América Latina. Factores como el cambio climático, la urbanización acelerada y la demanda creciente de sectores productivos generan desafíos complejos que requieren enfoques innovadores y adaptativos. Además, la sobreexplotación de acuíferos y la contaminación de fuentes hídricas incrementan la vulnerabilidad de comunidades y ecosistemas. Por tal motivo, resulta fundamental analizar los retos y oportunidades para garantizar un manejo eficiente y responsable del recurso.

Entre los principales desafíos relacionados con los recursos hídricos se encuentran el cambio climático, el estrés hídrico y la pérdida de agua, así como la gestión inadecuada en entornos urbanos. Estos problemas no solo afectan la disponibilidad de agua potable, sino que también tienen impactos directos sobre la producción agrícola, la industria y la salud pública. Por consiguiente, enfrentar estas dificultades requiere implementar políticas, infraestructura y estrategias de gestión que promuevan un uso racional del recurso. Adicionalmente, la colaboración entre Gobiernos, empresas y ciudadanía es clave para fortalecer la resiliencia regional.

Por otro lado, las oportunidades para la sostenibilidad hídrica se enfocan en la adopción de tecnologías avanzadas que optimicen y aumenten la eficiencia en el uso del agua. Herramientas como la digitalización, la automatización de riego y la recolección de agua de lluvia generan soluciones sostenibles y adaptativas. Estas innovaciones facilitan la toma de decisiones basada en datos, reducen desperdicios y fomentan prácticas responsables en sectores agrícolas, industriales y urbanos.

Por último, la sostenibilidad hídrica demanda un enfoque integral que incluya eficiencia, equidad y conservación ambiental. La implementación de acciones estratégicas, integrales y adaptativas asegura un manejo responsable del agua, fortaleciendo la capacidad de respuesta ante fenómenos climáticos extremos y la presión creciente sobre los recursos. Asimismo, promueve la conciencia social y la participación activa de la población en la gestión del agua.

5.1. Retos en la sostenibilidad hídrica

El cambio climático intensifica la crisis hídrica en América Latina, generando fenómenos extremos como sequías e inundaciones que afectan drásticamente la disponibilidad de agua potable. A pesar de contar con aproximadamente un tercio de los recursos hídricos del planeta, la región enfrenta un aumento del estrés hídrico debido a la sobreexplotación, contaminación y creciente demanda del recurso, especialmente en zonas rurales y urbanas densamente pobladas. Estos desafíos requieren enfoques integrales que consideren factores climáticos, sociales y económicos para garantizar un suministro adecuado y equitativo de agua a largo plazo (Idrica, 2024).

En este contexto, se estima que para 2030 la brecha entre la demanda proyectada y la oferta de agua disponible podría alcanzar el 40 % a nivel mundial, generando presiones económicas y sociales muy significativas. En América Latina, cerca de 150 millones de personas viven en áreas con gran escasez de agua, lo que agrava la situación, afectando la agricultura, la industria y la seguridad alimentaria. Esto pone de relieve la urgencia de fortalecer sistemas de monitoreo, políticas de conservación y programas de educación sobre el uso eficiente del agua (Banco Mundial, 2022).

Asimismo, la contaminación de fuentes hídricas es una preocupación creciente, especialmente en zonas urbanas e industriales altamente contaminadas que impactan la salud pública. Dentro de este escenario, el 43 % de los cuerpos de agua de la región y casi la mitad de sus acuíferos están contaminados, en parte debido al 36 % de las aguas residuales que se liberan sin un tratamiento adecuado. Estos factores comprometen la salud de la población y la biodiversidad, por lo que se hacen necesarias estrategias de tratamiento,

regulación y educación ambiental para reducir los impactos negativos sostenibles y preservar los ecosistemas (Banco Mundial, 2025).

Para abordar estos desafíos, es esencial mejorar la gestión del agua mediante políticas públicas efectivas, fortalecimiento institucional y proyectos de infraestructura adecuados que incluyan tecnología y cooperación regional. La implementación de soluciones sostenibles y adaptativas es crucial para salvaguardar el acceso equitativo y la conservación de este recurso vital, asegurando también la resiliencia frente a futuras crisis. Del mismo modo, se recomienda integrar la participación comunitaria, tecnologías innovadoras y cooperación regional para lograr un manejo hídrico resiliente frente a la variabilidad climática y la creciente demanda global (Banco Mundial, 2022).

5.1.1. Principales desafíos hídricos en Latinoamérica

Tomando como base lo planteado por Idrica (2024), la sostenibilidad hídrica en América Latina se presenta como un desafío crítico debido a la creciente presión sobre los recursos de agua. Esto obliga a analizar los factores climáticos, urbanos y tecnológicos que inciden en la disponibilidad y calidad del recurso hídrico, con el objetivo de implementar soluciones innovadoras y sostenibles que beneficien a la población y al ecosistema.

5.1.1.1. Cambio climático. Incrementa la frecuencia e intensidad de sequías e inundaciones, afectando la disponibilidad de agua potable y la producción agrícola, además de aumentar la vulnerabilidad de comunidades y ecosistemas dependientes de este recurso. Esto genera un reto urgente para la gestión hídrica a nivel regional.

5.1.1.2. Estrés hídrico y pérdida de agua. Esta situación se agrava por la sobreexplotación de acuíferos, fugas en redes y demanda creciente, compromete la eficiencia de los sistemas de distribución y la seguridad hídrica de la población, incrementando la necesidad de infraestructura moderna y políticas de conservación efectivas.

5.1.1.3. Gestión del agua en el ámbito urbano. El rápido crecimiento urbano, la falta de infraestructura adecuada y la contaminación dificultan el suministro confiable de agua y la gestión de aguas residuales en las ciudades,

obligando a los Gobiernos a implementar soluciones integrales y adaptativas que garanticen cobertura y calidad.

5.1.1.4. Tecnología en la gestión del agua en la agricultura y la industria. La adopción de tecnologías avanzadas permite optimizar el uso del agua, reducir costos y minimizar impactos ambientales en los sectores agrícola e industrial, facilitando la toma de decisiones basadas en datos y promoviendo prácticas sostenibles.

5.1.1.5. Digitalización en el sector del agua. La digitalización del sector hídrico, mediante sensores, plataformas de datos y automatización, mejora la eficiencia operativa, la sostenibilidad y la toma de decisiones basadas en información en tiempo real, contribuyendo a la detección temprana de problemas y al manejo preventivo de recursos.

En conclusión, garantizar la sostenibilidad hídrica en América Latina requiere integrar enfoques multidisciplinarios que consideren aspectos sociales, ambientales y tecnológicos. En este objetivo, la cooperación entre Gobiernos, sector privado y comunidades resulta esencial para implementar soluciones efectivas y resilientes. Asimismo, fomentar la innovación y la educación ambiental coadyuva a fortalecer la gestión del agua y a proteger los ecosistemas a largo plazo.

5.2. Oportunidades en la sostenibilidad hídrica

Para Defelipe (2025), la crisis hídrica global y el crecimiento demográfico resaltan la urgencia de transformar la forma en la que se gestiona el agua, especialmente en América Latina, donde el consumo per cápita es elevado y los sistemas de abastecimiento enfrentan una presión constante. En este contexto, la digitalización se presenta como una herramienta clave para optimizar recursos y reducir pérdidas, ya que posibilita monitorear datos en tiempo real y mejorar la eficiencia operativa de los sistemas. Tecnologías como la IA y los gemelos digitales facilitan la simulación de escenarios y la planificación estratégica, promoviendo decisiones más sostenibles en el manejo hídrico.

En el sector agrícola, que concentra la mayor proporción del uso de agua dulce, las innovaciones tecnológicas permiten un aprovechamiento más eficiente y responsable de los recursos hídricos a través de la implementación de sensores solares, sistemas de riego automatizados y plataformas digitales que recopilan información sobre humedad del suelo, niveles freáticos y precipitaciones. Estas herramientas ayudan a tomar decisiones en tiempo real, optimizan la planificación de tareas y reducen pérdidas asociadas al exceso de riego o enfermedades de los cultivos (Defelipe, 2025).

En el ámbito urbano, Defelipe (2025), sostuvo que la digitalización transforma la gestión de servicios públicos de agua mediante plataformas integrales que combinan sistemas de información al cliente, monitoreo de datos de medición y movilidad laboral de la fuerza operativa, lo que incrementa la eficiencia, la transparencia y la capacidad de respuesta ante las incidencias que surjan. Los medidores inteligentes facilitan la lectura remota y detectan consumos atípicos, contribuyendo a reducir fugas, fraudes y desperdicio de agua, a la vez que fomentan la participación activa de los usuarios en el uso racional del recurso. Así, la tecnología urbana fortalece la sostenibilidad del suministro y mejora la resiliencia de las ciudades frente a eventos extremos.

Las tendencias recientes apuntan a una gestión hídrica cada vez más digitalizada e inteligente, en la que la integración de sensores, plataformas de análisis de datos y sistemas de automatización posibilita simular escenarios, anticipar problemas y optimizar procesos en tiempo real. La digitalización de plantas de tratamiento y redes de distribución convierte a estas infraestructuras en sistemas proactivos capaces de adaptarse a variaciones en la demanda y las condiciones climáticas. Este enfoque no solo mejora la eficiencia operativa, sino que fortalece la sostenibilidad hídrica y asegura la disponibilidad del recurso para las generaciones futuras (Defelipe, 2025).

5.2.1. Tecnologías de sostenibilidad del agua

De acuerdo con la empresa tecnológica Microsoft (2025), las tecnologías de sostenibilidad del agua ofrecen soluciones innovadoras para enfrentar la creciente presión sobre los recursos hídricos, integrando procesos que optimizan

el uso, la calidad y la disponibilidad del agua. Asimismo, mejoran la eficiencia en los sectores agrícolas, industriales y urbanos, al mismo tiempo que fortalecen la resiliencia frente a fenómenos climáticos extremos y promueven la generación de energía limpia. Estos son algunos ejemplos:

- **Desalinización de agua:** Consiste en la eliminación de sales y minerales del agua de mar o salobre, haciéndola apta para el consumo humano y para otros usos. Además, proporciona agua dulce confiable, aunque es costosa y consume gran cantidad de energía.
- **Purificación del agua:** Remueve impurezas y contaminantes para garantizar su potabilidad y reducir riesgos de enfermedades. De la misma manera, propicia el uso seguro en las industrias y la agricultura al mejorar la calidad del recurso.
- **Productividad del agua:** Mediante tecnologías como el riego por goteo y sistemas inteligentes, se optimiza la cantidad de agua aplicada a los cultivos. Esto aumenta la eficiencia en la producción agrícola y reduce desperdicios.
- **Eficiencia del agua:** Medidores inteligentes, detección de fugas y electrodomésticos de bajo consumo contribuyen a reducir el desperdicio de agua en los hogares, promoviendo un uso más responsable y facilitando reparaciones oportunas ante probables fallas.
- **Recolección de agua:** Los sistemas de captación de lluvia permiten recolectar agua para riego y usos no potables, disminuyendo la presión sobre fuentes municipales. Reducen la escorrentía, la erosión y fortalecen la resiliencia frente a sequías.
- **Agua y energía:** El agua se utiliza en la generación hidroeléctrica y en tecnologías hidrocinéticas, proporcionando fuentes limpias y renovables de energía, lo que ayuda a reducir las emisiones de carbono y promueve la sostenibilidad energética.
- **Agua y TI:** La tecnología de la información facilita la recopilación, el análisis y la gestión de datos hídricos para una buena toma de decisiones, a la vez que permite simulaciones que optimizan la distribución de los recursos y promueven la resiliencia ante las sequías.

La implementación de estas tecnologías constituye un elemento clave para garantizar un manejo responsable y eficiente de los recursos hídricos, contribuyendo con ello a la seguridad y disponibilidad del agua en diferentes sectores. Del mismo modo, su integración favorece la adaptación a los efectos del cambio climático y fortalece la resiliencia de las comunidades frente a fenómenos meteorológicos extremos (Microsoft, 2025).

5.3. Importancia de la sostenibilidad en la gestión hídrica

La sostenibilidad en la gestión hídrica se ha convertido en un eje central para enfrentar los desafíos derivados de la escasez y contaminación del agua, dado que asegura la disponibilidad del recurso a largo plazo. Con ese propósito, integra procesos tecnológicos y estratégicos que optimizan su uso y distribución eficiente, fortaleciendo la resiliencia frente a fenómenos climáticos extremos y promoviendo la eficiencia en sectores clave. Esto contribuye a preservar ecosistemas sensibles, reducir riesgos de desastres y garantizar el acceso equitativo al recurso para poblaciones vulnerables (Microsoft, 2025).

El manejo adecuado de los recursos hídricos en entornos urbanos hace posible minimizar pérdidas, mejorar la calidad del agua y garantizar la cobertura de servicios esenciales, mientras que la planificación estratégica de cuencas y redes facilita la sostenibilidad y la reducción de riesgos asociados a la demanda creciente. Asimismo, la implementación de infraestructura moderna y regulaciones efectivas favorece un control más eficiente del recurso y la mitigación de impactos ambientales. Estas acciones fortalecen la gobernanza del agua y promueven la colaboración entre Gobiernos, empresas y ciudadanos para un desarrollo urbano sostenible (UNIR, 2025).

En el ámbito agrícola e industrial, la adopción de tecnologías inteligentes, como sistemas de riego automatizados y monitoreo de consumo, optimiza la productividad del agua y reduce posibles desperdicios, promoviendo prácticas sostenibles. De la misma forma, mediante la integración de soluciones basadas en datos, las empresas pueden anticiparse a problemas de escasez y ajustar el uso hídrico según necesidades específicas, generando con ello beneficios eco-

nómicos y ambientales. Esto también fomenta la innovación tecnológica local y mejora la competitividad de los sectores productivos sin comprometer la disponibilidad futura del recurso (UDEP, 2025).

En última instancia, la incorporación de energías limpias y tecnologías de información en la gestión del agua fomenta un enfoque holístico que vincula la eficiencia, sostenibilidad y planificación estratégica. En consecuencia, estas prácticas no solo aseguran la continuidad del suministro para la población y los sectores productivos, sino que también fortalecen la capacidad de adaptación ante el cambio climático y los eventos extremos. De esta manera, se promueve un modelo de gestión hídrica integrado, donde la sostenibilidad, la innovación y la participación ciudadana convergen para garantizar recursos seguros y confiables (Microsoft, 2025).

5.3.1. Recomendaciones para una gestión hídrica eficiente

La gestión hídrica eficiente demanda enfoques estratégicos que consideren tanto la disponibilidad como la calidad del agua en el mediano y largo plazo, articulando la planificación territorial, la gestión de cuencas y las políticas de conservación. En ese marco, tales enfoques deben incorporar mecanismos de monitoreo continuo que permitan ajustar las decisiones frente a cambios ambientales o sociales, garantizando de esa forma un uso sostenible del recurso. Así, la estrategia empleada optimiza la distribución del agua, a la vez que previene riesgos asociados a sequías, contaminación y demandas crecientes.

Adicionalmente, los enfoques integrales fomentan la coordinación entre distintos sectores y niveles de gobierno, así como la participación de comunidades, empresas y organizaciones civiles. Esto hace posible considerar de manera simultánea los aspectos ambientales, sociales y económicos en la determinación de decisiones, lo cual promueve el equilibrio entre las necesidades humanas y la preservación de los ecosistemas. La integración de tecnología y datos científicos fortalece, al mismo tiempo, la capacidad de planificación y la efectividad de las políticas implementadas.

En consecuencia, una gestión adaptativa del agua implica flexibilidad para responder a incertidumbres climáticas, demográficas o económicas, ajustando prácticas y regulaciones de acuerdo a la situación específica de cada cuenca o territorio. Asimismo, tomando en cuenta experiencias previas, posibilita adoptar soluciones innovadoras que reduzcan los impactos negativos y mejoren la resiliencia de comunidades y ecosistemas. Este enfoque fomenta la anticipación de riesgos, la eficiencia en el uso de los recursos y la mejora continua de los sistemas de gestión hídrica.

En suma, la implementación de estas recomendaciones requiere la capacitación continua de los gestores, el fortalecimiento institucional, la innovación tecnológica y la promoción de una cultura del agua entre la población. Del mismo modo, resulta fundamental evaluar periódicamente los resultados y realizar ajustes estratégicos que garanticen sostenibilidad, la equidad y la resiliencia en el acceso al recurso. De esa manera, la combinación de enfoques estratégicos, integrales y adaptativos favorece una gestión hídrica eficiente, responsable y sostenible frente a los retos presentes y futuros.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABC News. (2025). *UN warns Colombia over mercury contamination in Atrato River, calls crisis a human rights emergency*. ABC News. <https://apnews.com/article/un-colombia-mercury-river-atrato-health-illegal-mining-b6273e2936749d38ddfedb2aee4e9815>

Alfaro-Sandí, J., Piedra-Marín, G., Saravia-Arguedas, A., & Piedra-Castro, L. (2021). Evaluación de los parámetros físicos y químicos del agua de mar en los alrededores de la Isla Uvita, Limón, Costa Rica. *Revista Tecnología en Marcha*, 34(2), 88–95. <https://doi.org/10.18845/tm.v34i2.4985>

Almafrachi, H., Gümüş, N., & Çorak, İ. (2025). Heavy metal bioaccumulation in fish: implications for human health risk assessment in ten commercial fish species from Konya, Türkiye. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 22(6), 4065–4074. https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/2025JEST...22.4065A/doi:10.1007/s13762-024-05875-3

Alvizuri-Tintaya, P., Villena-Martínez, E., Avendaño-Acosta, N., Lo-Iacono-Ferreira, V., Torregrosa-López, J., & Lora-García, J. (2022). Contamination of Water Supply Sources by Heavy Metals: The Price of Development in Bolivia, a Latin American Reality. *Water*, 14(21), 3470. <https://doi.org/10.3390/w14213470>

Anaya-Raymundo, M., Ruíz-Janje, A., Blas-Montenegro, L., Angulo-Valdivia, R., & De la Cruz, D. (2025). Origen, distribución y dinámica de metales pesados en suelos agrícolas: implicaciones edáficas y ambientales. *Manglar*, 22(2), 287–301. http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2414-10462025000200287

Aranguren-Díaz, Y., Galán-Freyle, N., Guerra, A., Manares-Romero, A., Pacheco-Londoño, L., Romero-Coronado, Andrea, Vidal-Figueroa, N., & Machado-Sierra, E. (2024). Aquifers and Groundwater: Challenges and Opportunities in Water Resource Management in Colombia. *Water*, 16(5), 685. <https://doi.org/10.3390/w16050685>

Aroh, K. (2018). Globalization, Industrialization and Population Growth the Fundamental Drivers of Pollution in a Given Society (India). *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3453740>

Avellán, T., Nagabhatla, N., Jalan, I., & Liao, D. (2022). Chapter 2 - Integrating circularity to achieve sustainability: Examples of various wastewater treatment systems. *Circular economy and sustainability*, 2, 21–35. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821664-4.00002-9>

Aziz, K., Mustafa, F., Khalid, O., Hama, S., Hamarawfa, R., & Rahmanac, K. (2023). Heavy metal pollution in the aquatic environment: efficient and low-cost removal approaches to eliminate their toxicity: a review. *RSC advances*, 13(26), 17595–17610. <https://doi.org/10.1039/D3RA00723E>

Bacha, L., da Silva, M., Santos, V., Ventura, R., de Rezende, C., Ottoni, A., Tschoeke, D., Cosenza, C., Thompson, C., & Thompson, F. (2022). Current status of drinking water quality in a Latin American megalopolis. *Water*, 15(1), 165. <https://doi.org/10.3390/w15010165>

Banchon, C. (2021). Airborne Bacteria from Wastewater Treatment and their Antibiotic Resistance: A Meta-Analysis. *Journal of Ecological Engineering*, 22(10), 205–214. 10.12911/22998993/142207.

Banco Mundial. (2017). *Repensar la Infraestructura en América Latina y el Caribe*. Banco Mundial. <https://openknowledge.worldbank.org/server/api/core/bitstreams/65c52036-f8f5-5274-8f23-9f2e5060e0e1/content>

Banco Mundial. (2022). *Gestión de los recursos hídricos*. Banco Mundial. <https://www.bancomundial.org/es/topic/waterresourcesmanagement?>

Banco Mundial. (2025). *América Latina y el Caribe necesita redoblar su transición hídrica*. Banco Mundial. <https://blogs.worldbank.org/en/latinamerica/transicion-hidrica-america-latina-y-el-caribe?>

Barrón, H. (2021). *Contaminación por metales pesados en suelo y agua de la zona chinampera de San Nicolás Tetelco, Tláhuac, Distrito Federal*. Universidad Autónoma Metropolitana. Unidad Xochimilco. <https://repositorio.xoc.uam.mx/jspui/handle/123456789/2095>

Bermúdez-Kuminev, F., Herrera-Murillo, J., Lépiz-López, L., & Campos-Zumbado, A. (2025). Evaluación de variables fisicoquímicas y concentraciones de metales pesados en muestras de agua de mar de playas recreativas de Costa Rica. *Geographical Journal of Central America*, 1(74), 27–53. <https://doi.org/10.15359/rgac.74-1.1>

Bertoméu-Sánchez, S., & Serebrisky, T. (2018). Latin American Countries: Water and Sanitation in Latin America and the Caribbean: An Update on the State of the Sector. En S. Porcher & S. Saussier (Eds.), *Facing the Challenges of Water Governance. Palgrave Studies in Water Governance: Policy and Practice*. (pp. 189–221). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-98515-2_8

Bishnu, P., Islam, S., KC, S., Anjuma, N., Poudelb, A., & Akter, S. (2024). Sources, effects and present perspectives of heavy metals contamination: Soil, plants and human food chain. *Heliyon*, 10(7), e28357. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e28357>

Borja-Serrano, P., Ochoa-Herrera, V., Maurice, L., Morales, G., Quilumbaqui, C., Tejera, E., & Machado, A. (2020). Determination of the Microbial and Chemical Loads in Rivers from the Quito Capital Province of Ecuador (Pichincha)—A Preliminary Analysis of Microbial and Chemical Quality of the Main Rivers. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(14), 5048. <https://doi.org/10.3390/ijerph17145048>

Brichetti, J., Mastronardi, L., Rivas, M., Serebrisky, T., & Solís, B. (2021). *La brecha de infraestructura en América Latina y el Caribe: estimación de las necesidades de inversión hasta 2030 para progresar hacia el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible*. Banco Interamericano de Desarrollo. <http://dx.doi.org/10.18235/0003759>

Briffa, J., Sinagra, E., & Blundell, R. (2020). Heavy metal pollution in the environment and their toxicological effects on humans. *Heliyon*, 6(9), e04691. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04691>

Bundschuh, J., Armienta, M., Morales-Simfors, N., Ayaz, M., López, D., & Delgado, V. (2021). Arsenic in Latin America: New findings on source, mobilization and mobility in human environments in 20 countries based on decadal research 2010-2020. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 51(16), 1727–1865. <https://doi.org/10.1080/10643389.2020.1770527>

Calderón-Guevara, M., Carpio-Rivera, N., & Galarza-Mora, W. (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. Autores/as Marco Napoleón Calderón-Guevara. *MQRInvestigar*, 7(3), 2545–2578. <https://doi.org/10.56048/MQR20225.7.3.2023.2545-2578>

Camiade, M., Bodilis, J., Chaftar, N., Riah-Anglet, W., Gardères, J., Buquet, S., Flores, A., & Pawlak, B. (2020). Antibiotic resistance patterns of *Pseudomonas* spp. isolated from faecal wastes in the environment and contaminated surface water. *FEMS microbiology ecology*, 96(2), fiae008. <https://doi.org/10.1093/femsec/fiae008>

Capela, C., Campos, H., Silva, E., Nascimento, H., Melo, E., & Coelho, M. (2024). Heavy Metals in Surface Waters in A State of The Brazilian Amazon: An Integrative Review. *RGSA – Revista de Gestão Social e Ambiental*, 18(6), 1–17. <https://doi.org/10.24857/rgsa.v18n6-102>

Cardoso, M., Scholz, M., & Antunes, M. (2019). Phosphorus recovery from municipal wastewater treatment: Critical review of challenges and opportunities for developing countries Author links open overlay panel. *Journal of environmental management*, 248, 109268. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109268>

Carvalho, T., Nascimento, A., Gonçalves, C., dos Santos, M., & Sales, A. (2020). Assessing the histological changes in fish gills as environmental bioindicators in Paraty and Sepetiba bays in Rio de Janeiro, Brazil. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 48(4), 590–601. https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-560X2020000400590&script=sci_arttext&tlng=en

Centeno, G., Eugenia, M., Sebastian, J., García, M., González, J., & Ramos-Villarroel, A. (2025). Ecological risk indices for heavy metals in the Morrocoy National Park: A study on recreational use. *Revista Ciencias Marinas y Costeras*, 17(1), 127–149. <https://doi.org/10.15359/revmar.17-1.7>

Cepal. (2023). *Plataforma Urbana y de Ciudades de América Latina y el Caribe*. Comisión Económica para América Latina y el Caribe. <https://plataformaurbana.cepal.org/es>

Chang-Sheng, Q., Zong-Wei, M., Jin, Y., Yang, L., Jun, B., & Lei, H. (2012). Human Exposure Pathways of Heavy Metals in a Lead-Zinc Mining Area, Jiangsu Province, China. *PLoS one*, 7(11), e46793. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0046793>

Chaves, M., Barbosa, S., Malinowski, M., Volpato, D., Castro, Í., Rodrigues, T., & Primel, E. (2020). Pharmaceuticals and personal care products in a Brazilian wetland of international importance: Occurrence and environmental risk assessment. *Science of the Total Environment*, 734, 139374. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139374>

Clavijo-Ayala, L., & Pillajo, W. (2019). Poder calorífico de la fracción orgánica biodegradable de los residuos sólidos urbanos generados en el sector sur de la ciudad de Quito. *Gestión y Ambiente*, 22(1), 19–29. <https://doi.org/10.15446/ga.v22n1.75473>

CooperAcción. (2025). *Contaminación del río Rímac: organizaciones sociales y expertos alertan sobre la urgencia de proteger el agua*. CooperAcción. <https://cooperaccion.org.pe/contaminacion-del-rio-rimac-organizaciones-sociales-y-expertos-alertan-sobre-la-urgencia-de-proteger-el-agua/>

Custodio, M., Fow, A., Chanamé, F., Orellana-Mendoza, E., Peñaloza, R., Alvarado, J., Cano, D., & Pizarro, S. (2021). Ecological Risk Due to Heavy Metal Contamination in Sediment and Water of Natural Wetlands with Tourist Influence in the Central Region of Peru. *Water*, 13(16), 2256. <https://doi.org/10.3390/w13162256>

Defelipe, S. (2025). *Eficiencia hídrica: Tecnología para la gestión del agua*. Impacto TIC. <https://impactotic.co/tecnologia/eficiencia-hidrica-tecnologia-para-la-gestion-del-agua/>

Deknock, A., De Troyer, N., Houbraken, M., Dominguez-Granda, L., Nolivos, I., Van Echelpoel, W., Eurie, M., Spanoghe, P., & Goethals, P. (2019). Distribution of agricultural pesticides in the freshwater environment of the Guayas river basin (Ecuador). *Science of the Total Environment*, 646, 996–1008. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.185>

Fajardo, N., Solís, H., & Gil, F. (2017). Determinación de metales pesados en los cuerpos de agua del Área de Conservación Regional Humedales de Ventanilla, Región Callao, Perú. *Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas*, 20(39), 149–158. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v20i39.14177>

Félix-López, M., Ormaza-Murillo, M., Álvarez-Santana, C., & Banchon, C. (2023). Exploring the Impact of Reclaimed Water on Latin America's Development. *Journal of Ecological Engineering*, 24(10), 157–173. <https://doi.org/10.12911/22998993/169962>

Ferronato, N., & Torretta, V. (2019). Waste Mismanagement in Developing Countries: A Review of Global Issues. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(6), 1060. <https://doi.org/10.3390/ijerph16061060>

Fuentes-Gandara, F., Pinedo-Hernández, J., Gutiérrez, E., Marrugo-Negrete, J., & Díez, S. (2021). Heavy metal pollution and toxicity assessment in Mallorquin swamp: A natural protected heritage in the Caribbean Sea, Colombia. *Marine Pollution Bulletin*, 167, 112271. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112271>

Fuentes, M., Sanguinetti, O., & Rojas, L. (2019). Evaluación del riesgo ambiental de metales pesados en los sedimentos superficiales del saco del Golfo de Cariaco. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 35(1), 101–114. <https://doi.org/10.20937/RICA.2019.35.01.07>

Fung, F., Wang, H.-S., & Menon, S. (2018). Food safety in the 21st century. *Biomedical Journal*, 41(2), 88–95. <https://doi.org/10.1016/j.bj.2018.03.003>

Gautam, P., Gautam, R., Banerjee, S., Chattopadhyaya, M., & Pandey, J. (2016). Heavy metals in the environment: fate, transport, toxicity and remediation technologies. *Nova Sci Publishers*, 60, 101–130. <https://acortar.link/NDmWEy>

Gil-Meseguer, E., Bernabé-Crespo, M., & Gómez-Espín, J. (2019). Recycled Sewage - A Water Resource for Dry Regions of Southeastern Spain. *Water Resources Management*, 33(2), 725–737. <https://doi.org/10.1007/s11269-018-2136-9>

González, O., & Paulino, M. (2020). Evaluación de metales pesados en ríos y truchas *Oncorhynchus mykiss* de la región Pasco, Perú. *Revista Iberoamericana Ambiente & Sustentabilidad*, 3(2), 32–48. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9016422>

González, V., Valle, S., Nirchio, M., Olivero, J., Tejeda, L., Valdelamar, J., Pesantes, F., & González, K. (2018). Evaluación del riesgo de contaminación por metales pesados (Hg y Pb) en sedimentos marinos del Estero Huaylá, Puerto Bolívar, Ecuador. *Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas*, 21(48), 75–82. https://www.researchgate.net/publication/334048280_Evaluacion_del_riesgo_de_contaminacion_por_metales_pesados_Hg_y_Pb_en_sedimentos_marinos_del_Estero_Huayla_Puerto_Bolivar_Ecuador

Gupta, N., Khan, K., & Santra, S. (2012). Heavy metal accumulation in vegetables grown in a long-term wastewater-irrigated agricultural land of tropical India. *Environmental Monitoring and Assessment*, 184(11), 6673–6682. <https://doi.org/10.1007/s10661-011-2450-7>

Hernández-Rodríguez, C.-B., Gutiérrez-Malaxechebarría, Á.-M., & Zafra-Mejía, C.-A. (2021). Reported Lead Levels in Different Environmental Matrices in Colombia. *Ingeniería y universidad*, 25. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8074344>

Gyawali, P., & Hewitt, J. (2020). Faecal contamination in bivalve molluscan shellfish: Can the application of the microbial source tracking method minimise public health risks? *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 16, 14–21. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2020.02.005>

Hamidian, A., Ozumchelouei, E., Feizi, F., Wu, C., Zhang, Y., & Yang, M. (2021). A review on the characteristics of microplastics in wastewater treatment plants: A source for toxic chemicals. *Journal of Cleaner Production*, 295, 126480. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126480>

Helmecke, M., Fries, E., & Schulte, C. (2020). Regulating water reuse for agricultural irrigation: risks related to organic micro-contaminants. *Environmental Sciences Europe*, 32(4). <https://doi.org/10.1186/s12302-019-0283-0>

Humaira, Q., Bhat, R., Mehmood, M., & Dar, G. (2020). *Fresh Water Pollution Dynamics and Remediation*. Springer. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-981-13-8277-2>

Idrica. (2024). *5 desafíos hídricos en América Latina*. Idrica. <https://www.idrica.com/es/blog/5-desafios-hidricos-en-america-latina/>

Inecol. (2025). *Contaminación hídrica y SIG en Atoyac*. Inecol. <https://www.inecol.mx/index.php/divulgacion/ciencia-hoy/contaminacion-hidrica-y-sig-en-atoyac>

Infobae. (2025). *Río Rímac agoniza: aguas negras con coliformes fecales y metales pesados contaminan el agua que llega a Lima*. Infobae. <https://www.infobae.com/peru/2025/08/25/rio-rimac-agoniza-aguas-negras-con-coliformes-fecales-y-metales-pesados-contaminan-el-agua-que-llega-a-lima/>

Iruoghene, G., Oghenenyoreme, L., Obasohan, P., Ovie, V., Oghenekeno, P., Ngukuran, A., Chikodiri, L., Avuokerie, H., Ugbune, U., Alex, E., Lucky, O., Ebosereme, I., Al-Sharabi, W., Othuke, P., Oghenewogaga, J., & Johnson, J. (2024). Impact of environmental pollution from human activities on water, air quality and climate change. *Ecological Frontiers*, 44(5), 874–889. <https://doi.org/10.1016/j.ecofro.2024.02.014>

Jomova, K., Alomar, S., Nepovimova, E., Kuca, K., & Valko, M. (2025). Heavy metals: toxicity and human health effects. *Archives of toxicology*, 99(1), 153–209. <https://doi.org/10.1007/s00204-024-03903-2>

Jones, E., van Vliet, M., Qadir, M., & Bierkens, M. (2021). Country-level and gridded estimates of wastewater production, collection, treatment and reuse. *Earth System Science Data*, 13(2), 237–254. <https://doi.org/10.5194/essd-13-237-2021>

Kim, J.-J., Kim, Y.-S., & Kumar, V. (2019). Heavy metal toxicity: An update of chelating therapeutic strategies. *Journal of Trace elements in Medicine and Biology*, 54, 226–231. <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2019.05.003>

Korc, M., & Hauchman, F. (2021). Advancing environmental public health in Latin America and the Caribbean. *Revista Panamericana de Salud Pública*, 45, e118. <https://doi.org/10.26633/RPSP.2021.118>

Kou, B., Yuan, Y., Zhu, X., Ke, Y., Wang, H., Yu, T., & Tan, W. (2024). Effect of soil organic matter-mediated electron transfer on heavy metal remediation: Current status and perspectives. *Science of The Total Environment*, 917, 170451. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170451>

Li, L., Wang, S., Shen, X., & Jiang, M. (2020). Ecological risk assessment of heavy metal pollution in the water of China's coastal shellfish culture areas. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(15), 18392–18402. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08173-w>

Londoño-Franco, L., Londoño-Muñoz, P., & Muñoz-García, F. (2016). Los riesgos de los metales pesados en la salud humana y animal. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 14(2), 145–153. http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S1692-35612016000200017&script=sci_arttext

López-Velázquez, K., Guzmán-Mar, J., Saldarriaga-Noreña, H., Murillo-Tovar, M., Hinojosa-Reyes, L., & Villanueva-Rodríguez, M. (2021). Occurrence and seasonal distribution of five selected endocrine-disrupting compounds in wastewater treatment plants of the Metropolitan Area of Monterrey, Mexico: The role of water quality parameters. *Environmental Pollution*, 269, 116223. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.116223>

López, C. (2024). Metales pesados: el daño invisible a la salud humana y ecosistémica. *Endémico*. <https://endemico.org/metales-pesados-el-dano-invisible-a-la-salud-humana-y-ecosistemica/>

Mamani, M., Blas, J., Izquierdo, S., Gonzales, G., Andrade, M., & Pari, D. (2025). Contenido de metales pesados en los peces en el Perú: una revisión sistémica. *Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales*, 12(1), 131–141. http://www.scielo.org.bo/scielo.php?pid=S2409-16182025000100131&script=sci_arttext

Mancilla-Villa, O., Gómez-Villaseñor, L., Palomera-García, C., Hernández-Vargas, O., Guevara-Gutiérrez, R., Ortega-Escobar, H., Flores-Magdaleno, H., Can-Chulim, Á., Sánchez-Bernal, E., Avelar-Roblero, J., & Cruz-Crespo, E. (2023). Heavy metals in water and macroinvertebrates of the Ayuquila-Armería river basin (Mexico) and its affluents. *Terra Latinoamericana*, 41. <https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1603>

Masindi, V., & Muedi, K. (2018). Environmental contamination by heavy metals. *Heavy metals*, 10(4), 115–133. <https://acortar.link/udgp84>

Mendoza-Escalona, B., Torres-Rodríguez, D., Merú, L., Gómez, C., Estanga-Barrios, M., & García-Orellana, Y. (2021). Concentración de metales pesados en suelos agrícolas bajo diferentes sistemas de labranza. *TecnoLógicas*, 24(51), 4–15. <https://www.redalyc.org/journal/3442/344265925001/html/>

Microsoft. (2025). *Water sustainability resources and technology*. Microsoft. <https://www.microsoft.com/en-gb/sustainability/learning-center/water-sustainability>

Nascimento, M., da Rocha, G., & de Andrade, J. (2021). Customized dispersive micro-solid-phase extraction device combined with micro-desorption for the simultaneous determination of 39 multiclass pesticides in environmental water samples. *Journal of Chromatography A*, 1639, 461781. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2020.461781>

Natasha, A., Shahid, M., Khalid, S., Niazi, N., Murtaza, B., Ahmad, N., Farooq, A., Zakir, A., Imran, M., & Abba, G. (2021). Health risks of arsenic buildup in soil and food crops after wastewater irrigation. *Science of the Total Environment*, 772, 145266. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145266>

Neira-Moscoso, C., Rojas-Sánchez, J., & Rodas-Espinoza, C. (2021). Metales pesados. *Coloquio*, 66, 72–77. <https://revistas.uazuay.edu.ec/index.php/coloquio/article/view/429>

Ngwenya, S., Mashau, N., Mudau, A., Mhlongo, S., & Traoré, A. (2024). Community Perceptions on Health Risks Associated With Toxic Chemical Pollutants in Kwekwe City, Zimbabwe: A Qualitative Study. *Environmental Health Insights*, 18, 11786302241260488. <https://doi.org/10.1177/11786302241260487>

Nishmitha, P., Ajayaghosh, K., Padmachandran, V., Ramesh, A., Muthukumar, A., & Muthuchamy, M. (2025). Understanding emerging contaminants in water and wastewater: A comprehensive review on detection, impacts, and solutions. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 18, 100755. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2025.100755>

Noyola, A., Padilla-Rivera, A., Morgan-Sagastume, J., Güereca, L., & Hernández-Padilla, F. (2012). Typology of Municipal Wastewater Treatment Technologies in Latin America. *Clean–Soil, Air, Water*, 40(9), 926–932. <https://doi.org/10.1002/clen.201100707>

Othman, Y., Al-Assaf, A., Tadros, M., & Albalawneh, A. (2021). Heavy Metals and Microbes Accumulation in Soil and Food Crops Irrigated with Wastewater and the Potential Human Health Risk: A Metadata Analysis. *Water*, 13(23), 3405. <https://doi.org/10.3390/w13233405>

Pabón, S., Benítez, R., Sarria, R., & Gallo, J. (2020). Contaminación del agua por metales pesados, métodos de análisis y tecnologías de remoción. Una revisión. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 14(27), 9–18. <https://doi.org/10.31908/19098367.1734>

Page, M., McKenzie, J., Bossuyt, P., Boutron, I., Hoffmann, T., Mulrow, C., Shamseer, L., Tetzlaff, J., Akl, E., Brennan, S., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J., Hróbjartsson, A., Lalu, M., Li, T., Loder, E., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., ... Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *Journal of Clinical Epidemiology*, 134, 178–189. <https://doi.org/10.1016/j.jclinepi.2021.03.001>

Pemberthy, D., Padilla, Y., Echeverri, A., & Peñuela, G. (2020). Monitoring pharmaceuticals and personal care products in water and fish from the Gulf of Urabá, Colombia. *Heliyon*, 6(6), e04215. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04215>

Peña, S., Mayorga, J., & Montoya, R. (2018). Propuesta de tratamiento de las aguas residuales de la ciudad de Yaguachi (Ecuador). *Ciencia e Ingeniería*, 39(2), 161–167. <https://www.redalyc.org/journal/5075/507557606007/html/>

Peñafiel, M., Vallejo, A., & Chalen, J. (2017). Evaluación de la calidad físico-químico en agua y sedimentos del estero salado en el noroeste de América Latina. *Polo del Conocimiento: Revista científico-profesional*, 2(6), 641–669. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9700019>

Peralta, C. (2024). El derecho humano al agua en Chapala. Periferia del área metropolitana de Guadalajara. *Carta económica regional*, 32(124), 135–156. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2683-28522019000200135&script=sci_arttext

Pérez, D., Iturburu, F., Calderon, G., Oyesqui, L., De Gerónimo, E., & Aparicio, V. (2021). Ecological risk assessment of current-use pesticides and biocides in soils, sediments and surface water of a mixed land-use basin of the Pampas region, Argentina. *Chemosphere*, 263, 128061. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128061>

Piowarska, D., Kiedrzyńska, E., & Kiedrzyńska, E. (2024). A global perspective on the nature and fate of heavy metals polluting water ecosystems, and their impact and remediation. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 54(19), 1436–1458. <https://doi.org/10.1080/10643389.2024.2317112>

Rachmadi, A., Kitajima, M., Kato, T., Kato, H., Okabe, S., & Sano, D. (2020). Required Chlorination Doses to Fulfill the Credit Value for Disinfection of Enteric Viruses in Water: A Critical Review. *Environmental Science & Technology*, 54(4), 2068–2077. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b01685>

Rajendran, S., Priya, T., Khoo, K., Hoang, T., Ng, H.-S., Halimatul, H., Karman, C., Orooji, Y., & Show, P. (2022). A critical review on various remediation approaches for heavy metal contaminants removal from contaminated soils. *Chemosphere*, 287, 132369. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132369>

Ramírez-Cota, M., Escobar-Sánchez, O., Betancourt-Lozano, M., Frías-Espicueta, M., Zamora-Arellano, N., & Osuna-Martínez, C. (2025). Heavy metals in drinking water sources in northern Mexico: a review of concentrations and human health risks assessment Open Access. *Journal of Water and Health*, 23(6), 684–700. <https://doi.org/10.2166/wh.2025.274>

Ramírez, M., Escobar, O., & Betancourt, M. (2023). Metales pesados: antagonistas de la salud en México. *Ciencia*, 74(3), 24–29. <https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/index.php/vol-74-numero-3/352-novedades-cientificas/1031-metales-pesados-antagonistas-de-la-salud-en-mexico>

Riascos-Flores, L., Bruneel, S., Van der Heyden, C., Deknock, A., Van Echelpoel, W., Eurie, M., De Saeyer, N., Vanden, W., Spanoghe, P., Bermudez, R., Dominguez-Granda, L., & Goethals, P. (2021). Polluted paradise: Occurrence of pesticide residues within the urban coastal zones of Santa Cruz and Isabela (Galapagos, Ecuador). *Science of The Total Environment*, 763, 142956. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142956>

RTv Noticias. (2025). *ONU alerta a Colombia por contaminación con mercurio en el río Atrato*. RTv Noticias. <https://rtvnoticiasmorelos.mx/onu-alerta-a-colombia-por-contaminacion-con-mercurio-en-el-rio-atrato/>

Ruiz, D., Niño, C., Pereira, A., & Blanco, M. (2025). Potentially toxic elements in the Caribbean coastal region: A review. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 41. <https://doi.org/10.20937/RICA.55258>

Salas, D., Belizario-Quispe, G., & Horna-Muñoz, D. (2023). Heavy Metal Pollution Assessment in Lake Rinconada in the Southern Andes, Peru. *Pollution*, 9(2), 477–493. <https://doi.org/10.22059/poll.2022.346689.1558>

Salvador, D., Neto, C., Benoliel, M., & Caeiro, M. (2020). Assessment of the presence of hepatitis E virus in surface water and drinking water in Portugal. *Microorganisms*, 8(5), 761. <https://doi.org/10.3390/microorganisms8050761>

Sánchez-Castillo, D., Zuloaga-Candia, P., & Gamarra-Peralta, K. (2024). Determinación de la contaminación por metales pesados en los sedimentos superficiales de la subcuenca del río Antabamba en un período de mediano plazo. *Revista de Investigación en Ciencia y Tecnología*, 6(2), 49–54. <https://doi.org/10.57166/riqchary.v6.n2.2024.127>

Sankhla, M., Kumari, M., Manisha, R., & Agrawal, P. (2016). Heavy Metals Contamination in Water and their Hazardous Effect on Human Health-A Review. *Int. J. Curr. Microbiol. App. Sci.*, 5(10), 759–766. <http://dx.doi.org/10.20546/ijcmas.2016.510.082>

Saravanan, A., Kumar, P., Jeevanantham, S., Karishma, S., Tajsabreen, B., Yaashikaa, P., & Reshma, B. (2021). Effective water/wastewater treatment methodologies for toxic pollutants removal: Processes and applications towards sustainable development. *Chemosphere*, 280, 130595. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130595>

Sarker, B., Keya, K., Mahir, F., Nahiun, K., Shahida, S., & Khan, R. (2021). Scientific Review Surface and Ground Water Pollution: Causes and Effects of Urbanization and Industrialization in South Asia. *Scientific Review*, 7(3), 32–41. <https://doi.org/10.32861/sr.73.32.41>

Shah, V., Mahanty, B., & Daverey, A. (2024). Biocalcification-Based Stabilization of Cadmium-Enriched Phytoremediation Biomass Using *Advenella* sp. AV1. *Water, Air, & Soil Pollution*, 235(3), 185. <https://doi.org/10.1007/s11270-024-06994-w>

Singh, A., Singh, B., Raghav, Y., & Mishra, V. (2024). *Regulatory Frameworks and Guidelines Aimed at Controlling and Minimizing Heavy Metals Exposure*. CRC Press. <https://acortar.link/Hc3wkG>

Soto-Benavente, M., Rodriguez-Achata, L., Olivera, M., Arostegui, V., Colina, C., & Garate, J. (2020). Riesgos para la salud por metales pesados en productos agrícolas cultivados en áreas abandonadas por la minería aurífera en la Amazonía peruana. *Scientia Agropecuaria*, 11(1), 49–59. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2020.01.06%0A>

Souza, M., Rocha, B., Adeyemi, J., Nadal, M., Domingo, J., & Barbosa, F. (2022). Legacy and emerging pollutants in Latin America: A critical review of occurrence and levels in environmental and food samples. *Science of the Total Environment*, 848, 157774. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157774>

Tejada-Purizaca, T., Garcia-Chevesich, P., Ticona-Quea, J., Martínez, G., Martínez, K., Morales-Paredes, L., Romero-Mariscal, G., Arenazas-Rodríguez, A., Vanzin, G., Sharp, J., & McCray, J. (2024). Heavy Metal Bioaccumulation in Peruvian Food and Medicinal Products. *Foods*, 13(5), 762. <https://doi.org/10.3390/foods13050762>

The Guardian. (2025). *'You can't even wash your hands': is a global industrial hub responsible for the destruction of Mexico's Atoyac River?* The Guardian. <https://www.theguardian.com/global-development/2024/oct/31/you-cant-even-wash-your-hands-is-a-global-industrial-hub-responsible-for-the-destruction-of-mexicos-atoyac-river>

UDEP. (2025). *La gestión hídrica es clave para hallar soluciones sostenibles afirman expertos*. UDEP. <https://www.udep.edu.pe/hoy/2025/10/la-gestion-hidrica-es-clave-para-hallar-soluciones-sostenibles-afirman-expertos/>

UNEP. (2025). *Heavy Metals*. United Nations Environment Programme. https://www.unep.org/cep/heavy-metals?utm_source

Unesco. (2017). *Informe Mundial sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas 2017: Las aguas residuales: el recurso desaprovechado, resumen ejecutivo*. Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000247552_spa

Ungureanu, N., Vlăduț, V., & Voicu, G. (2020). Water Scarcity and Wastewater Reuse in Crop Irrigation. *Sustainability*, 12(21), 9055. <https://doi.org/10.3390/su12219055>

UNIR. (2025). *Gestión y cuidado del agua, un pilar esencial en el desarrollo sustentable*. UNIR. <https://mexico.unir.net/noticias/ingenieria/gestion-cuidado-del-agua/>

Yao, J., Kong, Q., Qiu, Z., Chen, L., & Shen, D. (2019). Patterns of heavy metal immobilization by MSW during the landfill process. *Chemical Engineering Journal*, 375, 122060. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.122060>

Zarei, M. (2020). Wastewater resources management for energy recovery from circular economy perspective. *Water-Energy Nexus*, 3, 170–185. <https://doi.org/10.1016/j.wen.2020.11.001>

Zhang, C., Li, J., Dai, Y., Gustave, W., Zhai, W., Zhong, Z., & Chen, J. (2023). Spatial and Temporal Variations of Heavy Metals' Bioavailability in Soils Regulated by a Combined Material of Calcium Sulfate and Ferric Oxide. *Toxics*, 11(4), 296. <https://doi.org/10.3390/toxics11040296>

Zhao, L., Gong, D., Zhao, W., Lin, L., Yang, W., Guo, W., Tang, X., & Li, Q. (2020). Spatial-temporal distribution characteristics and health risk assessment of heavy metals in surface water of the Three Gorges Reservoir, China. *Science of the Total Environment*, 704, 134883. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134883>

SOBRE LOS AUTORES

Rodolfo Rafael Sánchez Valencia

Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa

<https://orcid.org/0000-0001-8492-9113>

Nelly Aurora Perez Diaz

Universidad Nacional Mayor de San Marcos

<https://orcid.org/0000-0003-1773-8987>

Manuel Emilio Reátegui Inga

Universidad Nacional Intercultural de la Selva Central Juan Santos
Atahualpa

<https://orcid.org/0000-0002-5417-6509>

Santiago Alberto Casas Luna

Universidad Nacional de San Martín

<https://orcid.org/0000-0003-3755-4093>

PRESENCIA DE METALES PESADOS Y LA CONTAMINACIÓN EN AGUAS DE LATINOAMÉRICA: RIESGOS PARA LA SALUD Y EL MEDIO AMBIENTE



www.arcoeditores.com
contato@arcoeditores.com
(55)99723-4952