

Metodologías para evaluar la contaminación descargada sobre cuerpos hídricos: metales pesados en sedimentos viales

Methodologies for assessing pollution discharged into water bodies: Heavy metals in road sediments

Juan Osorio-Sánchez ¹, Carlos Zafra-Mejía ², Joaquín Suárez-López ³

¹ Grupo de Investigación para el Desarrollo Sostenible (INDESOS), Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia. Orcid: [0000-0002-2364-252X](https://orcid.org/0000-0002-2364-252X). Correo electrónico: jdosorios@udistrital.edu.co

² Grupo de Investigación en Ingeniería Ambiental (GIIAUD), Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia. Orcid: [0000-0002-4061-4897](https://orcid.org/0000-0002-4061-4897). Correos electrónicos: czafra@udistrital.edu.co

² Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente (GEAMA), Centro de Innovación Tecnológica en Edificación e Enxeñaría Civil, Universidade da Coruña, España. Orcid: [0000-0001-7126-5231](https://orcid.org/0000-0001-7126-5231). Correo electrónico: joaquin.suarez@udc.es

Recibido: 2 febrero, 2024. Aceptado: 26 junio, 2024. Versión final: 30 julio, 2024.

Resumen

El artículo tiene como objetivo revisar las metodologías existentes para evaluar la contaminación por metales pesados (MP) asociada con el sedimento vial, la cual es descargada sobre cuerpos hídricos urbanos. La revisión sistemática de literatura utilizó un índice de frecuencia de citación (Q) para establecer la importancia de las variables consideradas. Los resultados indican que las variables clave a considerar son las siguientes: Precipitación (Q = 0,83), sólidos totales (0,70), metales pesados (0,61), hidrocarburos (0,32), Residuos sólidos (0,27) y Escorrentía (0,23). Los MPs de mayor relevancia son los siguientes: Zn (0,79), Cu (0,76), Ni (0,68), Cr (0,65) y Pb (0,46). Las metodologías de evaluación detectadas son las siguientes: Análisis químico (0,30), impacto biológico (0,29), modelización numérica (0,29), análisis granulométrico (0,29) y simulaciones en laboratorio (0,22). Los MPs mayoritarios en ambientes viales son Zn y Ni, y los sólidos totales pueden ser utilizados como indicadores de MPs en la escorrentía vial.

Palabras clave: recursos hídricos; contaminación vial; sedimento vial urbano; metal pesado; calidad del agua.

Abstract

The article aims to review existing methodologies to assess heavy metal (HM) pollution associated with road sediment, which is discharged into urban water bodies. The systematic literature review used a citation frequency index (Q) to establish the importance of the variables considered. The results indicate that the key variables to be considered are as follows: Precipitation (Q = 0.83), total solids (0.70), heavy metals (0.61), hydrocarbons (0.32), solid waste (0.27) and runoff (0.23). The most relevant HMs are the following: Zn (0.79), Cu (0.76), Ni (0.68), Cr (0.65) and Pb (0.46). The evaluation methodologies detected are as follows: Chemical analysis (0.30), biological impact (0.29), numerical

modeling (0.29), granulometric analysis (0.29) and laboratory simulations (0.22). The major HMs in road environments are Zn and Ni, and total solids can be used as indicators of HMs in road runoff.

Keywords: Water resources; Road pollution; Urban road sediment; Heavy metal; Water quality.

1. Introducción

Los cuerpos hídricos tales como ríos y humedales suministran una importante función ecológica para las ciudades, ya que éstos proveen hábitats a numerosas especies de flora y fauna, previenen de inundaciones, recargan los acuíferos, son fundamentales en procesos migratorios de aves, preservan el capital genético, purifican el agua y absorben carbono [1]. Los cuerpos hídricos urbanos actúan también como un sistema natural que regula el flujo de agua, amortiguando los procesos erosivos durante los períodos lluviosos [2]. Los cuerpos hídricos se han visto afectados por la urbanización, la construcción de infraestructura y la actividad humana, lo que ha provocado la disminución de la calidad del agua y la pérdida de hábitats naturales para las especies [3]. Es importante también tener en cuenta que estos sistemas hídricos pueden verse afectados por la contaminación generada por el tráfico vehicular, la presencia de industrias y las actividades mineras. Estos factores contribuyen también al incremento de la contaminación atmosférica, que a su vez puede tener un impacto negativo sobre los recursos hídricos [4].

Las partículas contaminantes emitidas por los vehículos e industrias pueden depositarse sobre la superficie de los cuerpos hídricos, alterando su composición química y biológica [5]. Asimismo, los procesos de escorrentía y lavado de sedimentos viales pueden transportar metales pesados y otros contaminantes hacia éstos, afectando la calidad del agua y comprometiendo los ecosistemas acuáticos presentes en ellos [6]. El fenómeno de acumulación de sedimentos sobre las superficies urbanas se ha estudiado mundialmente, y se han desarrollado diferentes metodologías de muestreo, caracterización y evaluación de los contaminantes asociados. Estos sedimentos viales son depositados sobre la superficie urbana y posteriormente son transportados por la escorrentía superficial o resuspendidos por el viento y la turbulencia inducida por el tráfico [7]. La escorrentía vial llega al sistema de alcantarillado pluvial y posteriormente los sedimentos contaminados son descargados sobre los diferentes cuerpos de agua (p.ej., ríos y humedales) [8], [9].

Es importante destacar que se ha demostrado que los sedimentos viales también contienen elevadas concentraciones de metales pesados, los cuales pueden ser arrastrados por la escorrentía y transportados a los cuerpos de agua urbanos [10]. Aunque existen numerosos

estudios sobre la contaminación atmosférica relacionada con la presencia de metales pesados [11], [12], [13], también hay una gran cantidad de investigaciones enfocadas en la escorrentía vial y el impacto de los metales pesados sobre la calidad del agua en zonas urbanas [14]. De hecho, se ha investigado ampliamente el comportamiento de los metales pesados asociados con los sedimentos viales en los cuerpos de agua urbanos, y se han desarrollado diversas metodologías para evaluar y monitorear esta problemática [15].

En los corredores viales urbanos, la acumulación de sedimentos se relaciona principalmente con el tráfico vehicular y las estructuras adyacentes. Durante los días de tiempo seco, el tráfico y barrido de las calles contribuyen a la acumulación de sedimentos en la superficie urbana, los cuales se desprenden con el flujo de lluvia y la turbulencia inducida por el tráfico y el viento [16], [17]. Estos sedimentos viales pueden ser transportados hacia cuerpos de agua, en donde alteran los procesos biológicos a causa de la presencia de metales pesados. Así, resulta relevante estudiar las metodologías desarrolladas para evaluar las cargas de metales pesados descargadas sobre los cuerpos de agua urbanos [18].

Adicionalmente, es esencial documentar las metodologías utilizadas para evaluar la presencia de metales pesados en los sedimentos viales y su comportamiento en los cuerpos hídricos urbanos, con el objetivo de diseñar estrategias efectivas para disminuir o controlar la contaminación en estas áreas. Estos conocimientos permitirán un mejor manejo de la contaminación en las zonas urbanas y corredores viales, preservando la salud de los cuerpos hídricos urbanos y la biodiversidad que depende de ellos. Se debe considerar la interconexión entre la contaminación por sedimentos viales, la contaminación atmosférica y la preservación de los ecosistemas acuáticos, como por ejemplo los humedales cercanos. Los estudios sobre las metodologías de evaluación de metales pesados en sedimentos viales y su impacto en los cuerpos hídricos permitirán también desarrollar estrategias integradas que aborden eficazmente la contaminación en estas áreas urbanas, protegiendo así la calidad del agua y la salud de los ecosistemas acuáticos.

La evaluación de las descargas de metales pesados en cuerpos de agua urbanos se ha convertido en un tema de gran importancia ambiental [19]. La implementación de metodologías adecuadas para su evaluación es

fundamental para diseñar estrategias que permitan reducir o controlar la presencia de estos elementos metálicos. En este sentido, es importante destacar que existen diferentes fuentes que contribuyen a la acumulación de sedimentos en las zonas urbanas, por lo que la implementación de una estrategia integral que incluya medidas de prevención y control resulta imprescindible para minimizar los efectos negativos de la contaminación en los cuerpos de agua [20].

Los sedimentos viales que se acumulan en las zonas urbanas son una fuente importante de contaminación en los cuerpos hídricos, especialmente cuando se trata de metales pesados [21]. Estos sedimentos provienen de diferentes fuentes tales como la deposición atmosférica y emisiones desde tráfico [22], [23]. Durante los días de tiempo seco, el tráfico, el barrido de las calles y las estructuras viales son factores clave para la acumulación de sedimentos en la superficie urbana. El lavado de los contaminantes sedimentados en las vías aumenta debido al movimiento de los vehículos sobre las superficies viales húmedas [24]. Este comportamiento puede ser atribuido al desprendimiento y la suspensión de las partículas, estimulado por la perturbación física y la desintegración de hojas y otros restos vegetales que liberan contaminantes solubles y generan partículas de menor tamaño que son transportadas por la escorrentía con mayor facilidad, especialmente los contaminantes asociados con las partículas del corredor vial antes de llegar a la cuneta y así ingresar al sistema hídrico urbano [25], [26].

Se han implementado diversas metodologías para el estudio de los sedimentos encontrados en los corredores viales, y éstas son principalmente las siguientes [27]. 1) Muestreo de sedimentos: se recopila una muestra representativa de sedimentos del cuerpo hídrico y se analiza para detectar la presencia y concentración de contaminantes [28]. 2) Análisis químico: se realizan análisis químicos de los sedimentos para determinar la cantidad y tipo de contaminantes presentes [29]. 3) Evaluación del impacto biológico: se realizan estudios de los efectos biológicos de la contaminación de los sedimentos en los organismos acuáticos [30]. 4) Modelización numérica: se utilizan modelos numéricos para simular la dispersión y el transporte de los contaminantes de los sedimentos en el cuerpo hídrico [31]. 5) Teledetección: se utilizan técnicas de teledetección para detectar la presencia y concentración de contaminantes en los sedimentos a través de imágenes de satélite [7]. 6) Análisis granulométrico: permite determinar el tamaño de las partículas en los sedimentos, lo que es fundamental para evaluar su transporte y deposición en los cuerpos de agua [23]. 7) Simulaciones en laboratorio o túneles: permiten recrear las condiciones

de la escorrentía urbana y evaluar la eficacia de los sistemas de drenaje y tratamiento [26]. 8) Análisis estadísticos y de composición química: se utilizan para identificar las fuentes de contaminación y cuantificar la concentración de metales pesados en los sedimentos [32].

El objetivo de este artículo es realizar una revisión sistemática de literatura a nivel mundial sobre las metodologías existentes para evaluar la contaminación por metales pesados asociada con el sedimento vial, la cual es descargada sobre cuerpos hídricos urbanos. A través de esta revisión, se buscan identificar y analizar las metodologías más relevantes según su frecuencia de citación. Se pretende también describir las variables climáticas, morfológicas y antrópicas que influyen en la presencia de metales pesados en el sedimento vial. Adicionalmente, se proporciona información detallada sobre los principales metales pesados presentes en los sedimentos viales. Por último, se analizan las metodologías más utilizadas para evaluar el impacto de los metales pesados descargados sobre los cuerpos hídricos.

2. Materiales y métodos

2.1. Sistema de búsqueda bibliográfica

Se realizó una revisión sistemática de literatura acerca de las metodologías existentes para evaluar el grado de contaminación por sedimentos viales y metales pesados asociados con el sistema hídrico urbano. La revisión se realizó durante el período comprendido entre los años 2012-2022 [17]. Las bases de datos utilizadas fueron ScienceDirect, Taylor & Francis y Google Académico. Durante la revisión bibliográfica se tuvo en cuenta el contenido total de los documentos detectados en las bases de datos seleccionadas [33].

2.2. Sistema de análisis bibliográfico

El sistema de análisis bibliográfico consideró cuatro etapas y estuvo basado en el uso de un índice de frecuencia de citación para establecer un orden de importancia para las variables establecidas [26]. Así, se estableció un orden de importancia por medio de cuartiles (Q). Este índice tuvo una variación entre 0,0 y 1,0, en donde el primer cuartil (Q1) correspondió a valores del índice entre 0,75-1,0; Q2: 0,50-0,75, Q3: 0,25-0,50, y Q4: 0,25-0. Es decir, el cuartil Q1 asoció las variables de mayor frecuencia de citación. Por ejemplo, durante la segunda etapa de revisión se detectaron en la base de datos Google académico 18100 documentos que reportaron a los metales pesados, en comparación con los 93.100 documentos detectados durante la etapa 1. Es decir, el índice de citación para los metales pesados fue

$18.100/93.100 = 0,37$ (Q3), el cual correspondió al tercer cuartil de frecuencia de citación (Tabla 1).

2.2.1. Etapas de análisis

Para la definición de las etapas de análisis que se presentan en la Tabla 1, se realizó una búsqueda en conjunto con las siguientes palabras clave establecidas para este estudio (Etapa 1, universo de información): Recurso hídrico, Contaminación vial (Road pollution), Sedimentos urbanos (Urban sediments), Metales pesados (Heavy metals), y Salud pública (Public health). Para la segunda etapa (Etapa 2), se realizó la detección de las siguientes variables (palabras clave) que afectaron la cantidad de sedimentos generados y transportados hacia los cuerpos hídricos: precipitación, residuos sólidos, hidrocarburos, sólidos en suspensión, metales pesados, escorrentía y emisiones vehiculares [34]. La detección y verificación de estos términos se realizó a partir de las

metales pesados (palabras clave): níquel, zinc, cobre, cromo y plomo [6]. Esta detección y verificación de palabras clave nuevamente se realizó en todas las bases de datos. Por último, en la cuarta etapa (Etapa 4) se identificaron las metodologías para evaluar la contaminación en los cuerpos hídricos (palabras clave): simulaciones en laboratorio, análisis químico, evaluación del impacto biológico, modelización numérica y análisis granulométrico [35]. Todas las palabras clave fueron ingresadas en inglés en los motores de búsqueda de las bases de datos científicas consideradas en este estudio.

En la Etapa 1 se detectaron 95104 documentos (universo de información). La base de datos que detectó el mayor número de documentos fue Google Académico (93100 documentos, 97,9%), seguida por ScienceDirect (1.256; 1,32%) y Taylor & Francis (748; 0,78%).

Tabla 1. Variables influyentes, metales pesados y metodologías de evaluación en sistemas hídricos urbanos

Etapa	Palabras clave	Google Académico		ScienceDirect		Taylor & Francis		Índice medio (Q)	Cuartil medio
		Documentos encontrados	Índice (Q)	Documentos encontrados	Índice (Q)	Documentos encontrados	Índice (Q)		
1	Recurso hídrico, Contaminación vial, Sedimentos urbanos, Metales pesados, Salud pública	93.100	1	1.256	1	748	1	-	-
2	Precipitación	89.500	0,961	750	0,597	695	0,929	0,829	Q1
	Sólidos totales	78.600	0,844	480	0,382	658	0,880	0,702	Q2
	Metales pesados	60.600	0,651	342	0,272	669	0,894	0,606	Q2
	Hidrocarburos	40.300	0,433	520	0,414	74	0,099	0,315	Q3
	Residuos sólidos	35.700	0,383	453	0,361	50	0,067	0,270	Q3
	Escorrentía	16.200	0,174	535	0,426	65	0,087	0,229	Q4
	Emisiones vehiculares	15.800	0,170	230	0,183	64	0,085	0,147	Q4
3	Zinc	83.000	0,892	1234	0,982	370	0,495	0,790	Q1
	Cobre	73.200	0,786	950	0,756	553	0,739	0,761	Q1
	Níquel	74.900	0,805	1200	0,955	217	0,290	0,683	Q2
	Cromo	64.700	0,695	1225	0,975	211	0,282	0,651	Q2
	Plomo	51.500	0,553	894	0,712	74	0,099	0,455	Q3
4	Análisis químico	15.700	0,169	782	0,623	78	0,104	0,299	Q3
	Evaluación del impacto biológico	15.700	0,169	764	0,608	74	0,099	0,292	Q3
	Modelización numérica	16.500	0,177	745	0,593	69	0,092	0,288	Q3
	Análisis granulométrico	15.100	0,162	752	0,599	71	0,095	0,285	Q3
	Simulaciones en laboratorio	15.500	0,166	536	0,427	55	0,074	0,222	Q4

Fuente: elaboración propia.

palabras clave (keywords) reportadas por la base de datos ScineceDirect durante la Etapa 1. Para la tercera etapa (Etapa 3), se realizó la búsqueda de los principales

Durante las etapas 2, 3 y 4 se utilizaron los siguientes criterios de inclusión de información: (I) estudios con procesos de contaminación por metales pesados, (II)

variables que afectaron la cantidad, estado y transporte de los metales pesados, (III) metodologías de evaluación de la contaminación por metales pesados, (IV) la zona de estudio sea un cuerpo de agua, e (V) investigación en un espacio urbano. Así, se descartó el 98,2% de los documentos detectados por las bases de datos ScienceDirect, Taylor & Francis y Google Académico. Es decir, para la elaboración de este artículo de revisión se consideraron 120 artículos, los cuales representaron el 1,98% de los documentos detectados inicialmente por las tres bases de datos consideradas (Tabla 2).

2.3. Análisis estadístico

Se aplicó la prueba de correlación de Spearman (rs) [37] para estudiar las relaciones entre los principales contaminantes y las variables consideradas en las cuatro fases metodológicas, así como también para analizar las metodologías de estudio utilizadas. Adicionalmente, se utilizó estadística descriptiva, porcentajes y razones para examinar las tendencias geográficas y temporales de las subcategorías evaluadas) [38]. Todas las pruebas estadísticas se llevaron a cabo con un nivel de confianza del 95%. Se realizó un análisis de componentes principales mediante el software R. Esta es una técnica

conjunto de datos mientras conserva la mayor cantidad posible de su variabilidad [39].

3. Resultados

3.1. Variables influyentes, metales pesados y metodologías de evaluación

Los resultados mostraron el siguiente orden de importancia para los factores influyentes de la concentración de metales pesados en los sedimentos viales y que fueron descargados en sistema hídricos: Precipitación (Q1 = 0,83) > Sólidos totales (Q2 = 0,70) > Metales pesados (Q2 = 0,61) > Hidrocarburos (Q3= 0,32) > Residuos sólidos (Q3 = 0,27) > Escorrentía (Q4 = 0,23) > Emisiones Vehiculares (Q4 = 0,15) (Tabla 1). Así, se destacó a la precipitación como la principal variable que incidió en el comportamiento de las concentraciones de metales pesados en el sedimento vial, incluso se ha estudiado la influencia de su variabilidad [40]. El estudio de la precipitación permitió una comprensión más profunda sobre la influencia de las condiciones climáticas [41] y de las cargas de sedimento vial y metales pesados descargados en los sistemas hídricos urbanos [42].

Tabla 2. Variables que influyen en la concentración de metales pesados en la escorrentía superficial urbana

Variable	Influencia en la concentración de metales pesados	Índice medio (Q)	Cuartil medio
Precipitación	Presencia de metales como plomo, cadmio y zinc, que pueden ser liberados desde fuentes atmosféricas y depositados en las superficies urbanas [31].	0,83	Q1
Hidrocarburos	Presencia de metales como el plomo, cadmio y níquel, que son comúnmente asociados con las emisiones de combustibles fósiles y lubricantes [49].	0,70	Q2
Residuos sólidos	Los residuos sólidos, especialmente los provenientes de productos electrónicos y baterías, suelen contener metales pesados como plomo, cadmio, mercurio y cobre [38].	0,61	Q2
Escorrentía	Los metales comúnmente asociados incluyen plomo, cadmio, cobre y zinc, que pueden ser arrastrados por el agua de lluvia y aumentar su concentración en cuerpos de agua receptores [56].	0,32	Q3
Sólidos Totales	Metales como el plomo, cadmio y cobre tienen afinidad por las partículas sólidas, y su transporte puede estar asociado con la presencia de estos sólidos en el entorno [57].	0,27	Q3
Emisiones vehiculares	Las emisiones vehiculares suelen estar asociadas con metales como plomo, cadmio y níquel. Estos metales pueden provenir de la combustión de combustibles fósiles y el desgaste de piezas metálicas en los vehículos [16].	0,23	Q4

Fuente: elaboración propia.

de análisis de datos utilizada en estadística y aprendizaje automático para reducir la dimensionalidad de un

Los hallazgos evidenciaron que el orden de importancia para los metales pesados bajo el contexto de este estudio fue el siguiente: Zinc ($Q1 = 0,79$) > Cobre ($Q1 = 0,76$) > Níquel ($Q2 = 0,68$) > Cromo ($Q2 = 0,65$) > Plomo ($Q3 = 0,46$) (Tabla 1). Estos metales según los estudios se acumulan en las vías debido al desgaste de frenos y neumáticos de vehículos. En zonas urbanas con tráfico intenso se generan partículas finas que contienen metales pesados como plomo, cadmio y cobre [43]. Además, Martincic [43], en su estudio menciona que las emisiones del escape de vehículos, especialmente aquellos que utilizan combustibles fósiles, liberan gases contaminantes con metales pesados que se depositan en las vías urbanas a través de las emisiones atmosféricas o son arrastrados por el agua de lluvia hacia los sistemas de drenaje [44]. Bezerra [45], tribuye a las actividades industriales y la construcción en áreas urbanas el problema de liberar metales pesados en forma de partículas y polvo, que entran en contacto con las vías urbanas, ampliando la acumulación de estos metales en la superficie de las carreteras, y los procesos de construcción y demolición pueden también liberar metales pesados en el suelo; siendo transportados por el viento y depositándose en las vías urbanas [45].

Se observó que el orden de importancia para las metodologías de evaluación de los metales pesados descargados en sistemas hídricos urbanos fue el siguiente: Análisis químico ($Q3 = 0,30$) > Evaluación del impacto biológico ($Q3 = 0,29$) > Modelización numérica ($Q3 = 0,29$) > Análisis granulométrico ($Q3 = 0,29$) > Simulaciones en laboratorio ($Q4 = 0,22$) (Tabla 1). Según Espechit [44], el análisis químico es crucial para evaluar la contaminación en entornos urbanos, ya que éstos son altamente precisos y sensibles, permitiendo la detección de concentraciones bajas de metales pesados en los sedimentos viales [44]. Además, Aguilar [46], menciona que esta metodología ofrece una identificación específica de diferentes metales, tales como plomo, cadmio y cobre, proporcionando información detallada sobre la composición química. Su versatilidad para adaptarse a una amplia gama de metales pesados es esencial, ya que cada elemento puede tener distintos impactos ambientales y sobre la salud pública [46].

3.2. Metales pesados y contaminación hídrica

En este estudio los resultados muestran que las variables más influyentes para explicar las concentraciones de metales pesados dentro de los sedimentos son: Precipitación ($Q = 0,83$) e hidrocarburos ($Q = 0,70$) (Tabla 2). Estos hallazgos van en concordancia con los estudios de Salgado et al. [46], [47]. El metal pesado más relevante fue el Zinc (0,79), lo cual indica que es un metal pesado de importancia por su uso en pinturas; además de

encontrarse en los sedimentos, los cuerpos de agua y vegetación como lo exponen Gómez et al. [48], [51], [52] en sus estudios. Por otro lado, la metodología de mayor relevancia es el análisis químico (0,29), debido a su capacidad integral para evaluar la contaminación por metales pesados en los cuerpos de agua [51]. Este enfoque ofrece una evaluación detallada de la concentración y distribución de metales pesados, permitiendo una comprensión profunda de la magnitud del impacto ambiental [52].

La Tabla 2 presenta la influencia que tiene cada variable en el cambio de la concentración de metales pesados en los sedimentos urbanos, donde se destaca la precipitación como variable principal. Gómez [49] reporta que la precipitación influye en las concentraciones de metales pesados al eliminar partículas contaminadas de la atmósfera y las superficies urbanas. Al lavar tejados, calles y otras áreas, la lluvia arrastra consigo metales pesados depositados que son transportados por la escorrentía hacia cuerpos de agua o sistemas de alcantarillado [53].

Adicionalmente, existe una cantidad considerable de información relacionada con las cargas de metales pesados descargados dentro de las aguas pluviales y los sistemas combinados de aguas pluviales y de alcantarillado [54]. La información disponible sobre las cargas contaminantes en las aguas pluviales no es directamente relacionable con los contaminantes aportados por los materiales disponibles sobre las superficies viales [55]. Es decir, falta información sobre las relaciones entre los contaminantes de la superficie de las vías, sus características de contaminación y la forma en que se transportan durante los eventos de escorrentía durante las lluvias [34].

Los contaminantes de la escorrentía en vías aparecen en la superficie de éstas a partir de diferentes fuentes. Las fuentes pueden dividirse en cuatro categorías principales [58] y cuatro fuentes primarias [59]. Las categorías incluyen la deposición atmosférica, las emisiones desde los vehículos, la deposición directa e indirecta y la aplicación de materiales que contienen metales pesados [60]. Por otro lado, las fuentes primarias son la superficie de las vías, la superficie de los tejados, los jardines y el césped [61]. En la práctica, es muy difícil identificar cuál fuente produce cualquier tipo de contaminante. Frecuentemente en los estudios se le da importancia a los metales pesados que se pueden encontrar en la escorrentía superficial de diversas fuentes [62].

La segunda variable de influencia identificada bajo el contexto de este estudio son los hidrocarburos (0,70). Gómez et al. [63] reportan que la liberación de

hidrocarburos proviene de diversas actividades, tanto industriales como vehiculares. No solo representa una preocupación en sí misma, sino que también puede desencadenar procesos adicionales que afectan la movilización de metales pesados en el suelo y el agua. La presencia de metales tales como el plomo, cadmio y níquel, conocidos por sus efectos nocivos para la salud y el medio ambiente, se vincula estrechamente a las emisiones derivadas de combustibles fósiles y lubricantes [64].

La interacción entre los hidrocarburos y los metales pesados es un fenómeno complejo. Por un lado, la presencia de hidrocarburos puede actuar como un vehículo para la dispersión de metales pesados, facilitando su transporte a través de diferentes medios [65]. Además, la capacidad de los hidrocarburos para adsorber metales pesados en su estructura molecular puede aumentar la movilidad de estos elementos en el entorno [56].

En los sistemas de alcantarillado de aguas pluviales, los sedimentos encontrados pueden clasificarse en dos tipos: Sólidos de aguas pluviales y material de gravilla [20]. Los sólidos de las aguas pluviales, compuestos generalmente por una cuarta parte de materia orgánica, se transportan en suspensión [66], y los valores característicos citados en la literatura varían ampliamente [15]. Los sedimentos de arena constituyen la mayor parte, los cuales se depositan en las redes de alcantarillado [66], [67]. Estos sedimentos suelen ser transportados a lo largo del lecho de la corriente [69]. Aunque la diferenciación de los sedimentos de las aguas pluviales es complicada, se suelen definir como la fracción inorgánica de la escorrentía [9].

3.2.1. Características de los metales pesados en cuerpos hídricos

Los análisis realizados permitieron detectar los metales pesados presentes en los sedimentos viales (Tabla 3). El mercurio, con un índice medio de citación de 0.71, se destaca como el metal de mayor relevancia, seguido por cromo y plomo. Estos metales pesados con concentraciones en el rango entre 0,0001 a 0,01 mg/L [70], [71], se encuentran mayormente en el segundo cuartil de citación, indicando una presencia significativa en los sedimentos viales evaluados en este estudio. Esta clasificación provee un marco claro para priorizar la atención en la evaluación y gestión de la contaminación por metales pesados y es una guía para futuras investigaciones y estrategias de mitigación en áreas urbanas [72].

El segundo grupo de metales pesados (Zinc, Níquel, Cobre, y Cadmio) también muestra concentraciones considerables, en el rango entre 0,001 a 0,1 mg/L [73]. Estos metales pesados tienen índices medios de citación en el segundo y tercer cuartil (Tabla 3), lo cual revela una presencia significativa y potencialmente influyente en los cuerpos hídricos afectados por la descarga de sedimentos viales producto de la escorrentía urbana [43]. Así, la inclusión de estos metales pesados en la evaluación de la contaminación es esencial para comprender la complejidad del impacto ambiental sobre los cuerpos hídricos urbanos [14].

Elementos metálicos tales como el Boro, Arsénico, Manganeso, Hierro, Bario, y Aluminio exhiben concentraciones variadas en el rango de 0,0001 a 1,0 mg/L, con índices medios de citación que sugieren una menor importancia relativa en comparación con los metales previamente mencionados [74]. Sin embargo, su presencia no debe pasarse por alto, ya que incluso concentraciones aparentemente bajas pueden contribuir significativamente a la carga total de contaminantes en los cuerpos hídricos urbanos [75]. Por ejemplo, las concentraciones de metales pesados que oscilan entre 0,0001 y 0,01 mg/L sugieren una carga significativa de contaminantes en los humedales urbanos [76]. Estos valores, aunque aparentemente bajos, pueden tener efectos perjudiciales sobre la flora y fauna presentes en los humedales, dado que los metales pesados tienden a acumularse a lo largo del tiempo [19]. Esta tendencia subraya la importancia de investigar la presencia de estos metales como contaminantes en cuerpos hídricos, sugiriendo la posible influencia de actividades antropogénicas tales como la disposición inadecuada de residuos electrónicos que contienen plomo y mercurio, el uso de pesticidas y fertilizantes ricos en metales, y la escorrentía de carreteras [77]. Estas prácticas contribuyen al aumento de estos metales como contaminantes urbanos, los cuales pueden incorporarse a los cuerpos de agua a través de la escorrentía y la falta de sistemas de control adecuados en los puntos de ingreso a los cuerpos hídricos [78].

Como se observa en la Tabla 3, las concentraciones de metales pesados entre 0,001 -1 mg/L en la escorrentía pueden contribuir con una serie de problemáticas, tales como la contaminación directa de las aguas receptoras, la sobrecarga en las instalaciones de tratamiento y el deterioro de las funciones del alcantarillado y la cuenca de captación. Esto también lo reporta a nivel urbano Müller et al. [19], [67], [79]. Por otro lado, la composición de los sedimentos en el entorno urbano puede ser de origen físico, químico o biológico [16]. Estos materiales se generan bajo la influencia de las actividades humanas [34], provocando cambios

fundamentales en el estado natural de los cuerpos hídricos [62], [79].

Tabla 3. Identificación de los metales pesados más comunes en la escorrentía descargada sobre cuerpos hídricos urbanos

Metal pesado	Concentración (mg/L)	Índice medio (Q)	Cuartil medio
Mercurio (Hg)	0,0001 – 0,001	0,71	Q2
Cromo (Cr)	0,001 – 0,01	0,68	Q2
Plomo (Pb)	0,001 – 0,01	0,62	Q2
Zinc (Zn)	0,01 – 0,1	0,62	Q2
Níquel (Ni)	0,001 – 0,01	0,58	Q2
Cobre (Cu)	0,001 – 0,01	0,57	Q2
Cadmio (Cd)	0,0001 – 0,001	0,43	Q3
Cobalto (Co)	0,0001 – 0,001	0,33	Q3
Boro (B)	0,01 – 0,1	0,20	Q4
Arsénico (As)	0,0001 – 0,001	0,19	Q4
Manganeso (Mn)	0,01 – 0,1	0,19	Q4
Hierro (Fe)	0,1 - 1	0,14	Q4
Bario (Ba)	0,01 – 0,1	0,14	Q4
Aluminio (Al)	0,1 - 1	0,10	Q4

Fuente: elaboración propia.

Es importante destacar, que la escorrentía urbana libera todos los contaminantes de manera simultánea en una misma cuenca o durante un único evento; más bien, su presencia puede variar en términos de ubicación y tiempo [59]. La distribución temporal y espacial de la contaminación metálica es significativamente amplia en entornos urbanos [54]. Así, el Departamento de Transporte del Estado de Washington reporta que los parámetros más frecuentemente controlados en la escorrentía de las vías, por su variabilidad espaciotemporal, son los sedimentos y los metales pesados [68], [76].

La presencia de metales pesados y sólidos también puede agravar la contaminación de los cuerpos hídricos urbanos a través de procesos de lixiviación y erosión [55]. Cuando los sedimentos viales contaminados entran en contacto con el agua de lluvia (escorrentía vial) u otras fuentes de humedad, los metales pesados pueden lixiviar desde las partículas sedimentarias y disolverse en el agua [79]. Esta solución rica en metales pesados puede infiltrarse en el suelo [80] y alcanzar las aguas subterráneas, lo que

representa un riesgo a largo plazo para la calidad del agua potable en entornos urbanos [76].

3.2.2. Origen de los metales pesados

En la **Tabla 4** se exponen los diversos orígenes para los metales pesados presentes en los sedimentos viales. En efecto, este análisis permite comprender la contaminación que ingresa a los cuerpos hídricos urbanos, así como identificar el origen de estos metales pesados. Es importante destacar que el Cromo exhibe el mayor índice medio de citación (0,68), seguido por el Plomo, Zinc, Níquel y Cobre; todos ubicados en el cuartil Q2. Esta clasificación indica su relevancia en investigaciones a nivel mundial, subrayando el interés continuo en su estudio y monitoreo [3]. Como se evidencia también en la **Tabla 4**, los metales pesados provienen principalmente de los escapes y las emisiones de los vehículos [79]. Los vehículos son fuente de contaminación directa (piezas del vehículo) e indirecta (contaminantes que adquiere el vehículo para su posterior deposición) [16].

Los resultados muestran que los metales pesados provenientes del desgaste de los frenos (0,10-0,20) y neumáticos (0,90) son las fuentes más comunes en entornos viales [54]. En efecto, estos elementos metálicos se depositan principalmente sobre las superficies de las calles [80]. La abrasión de los neumáticos también produce contaminantes como goma, hollín y óxidos metálicos con Zn, Pb, Cr, Cu y Ni [81]. La abrasión de las pastillas de frenos aporta Ni, Cr, Cu, Pb y Fe a la escorrentía vial.

Kayhanian et al. [82] sugieren que la abrasión de los neumáticos sobre las superficies de las vías aumenta las concentraciones de sólidos suspendidos totales (SST) de 66 mg/L a 937 mg/L y las concentraciones de DQO de 2,0 mg/L a 36 mg/L. Esto al comparar las superficies de vías urbanas con las superficies de vías rurales.

Los hallazgos muestran que el origen más común entre los diferentes metales pesados es el desgaste de los neumáticos (**Tabla 4**). Esta fuente se ubica frecuentemente en el primer cuartil de citación. En efecto, esto sugiere que el desgaste de neumáticos es una fuente relevante para metales pesados tales como zinc y hierro [56]. En términos de importancia, el revestimiento metálico también se destaca por su aporte de metales pesados (vehículos y mobiliario urbano). Esto indica que el revestimiento metálico contribuye a la liberación de varios metales pesados y puede ser una fuente clave en diferentes contextos y para diversos metales, siendo especialmente relevante en el caso del cobre [49].

Tabla 4. Origen de los metales pesados en las vías que descargan escorrentía sobre cuerpos hídricos

Metal pesado	Origen del metal	Índice medio (Q)	Cuartil medio
Cromo (Cr)	Revestimiento metálico	0,53	Q2
	Piezas de motor	0,23	Q4
	Desgaste de los forros de freno	0,15	Q4
Plomo (Pb)	Combustible con plomo	0,65	Q2
	Deposición atmosférica	0,35	Q3
	Aceite, grasa y lubricantes	0,18	Q4
	Desgaste de neumáticos	0,10	Q4
	Desgaste de cojinetes	0,05	Q4
Zinc (Zn)	Aceite de motor	0,98	Q1
	Desgaste de neumáticos	0,90	Q1
	Grasa	0,88	Q1
Níquel (Ni)	Revestimiento metálico	0,48	Q3
	Gasóleo	0,30	Q3
	Asfalto	0,28	Q3
	Desgaste de los forros de freno	0,20	Q4
	Aceite lubricante	0,15	Q4
Cobre (Cu)	Revestimiento metálico	0,93	Q1
	Piezas de motor	0,65	Q2
	Desgaste de rodamientos	0,40	Q3
	Fungicidas e insecticidas	0,26	Q3
	Desgaste de pastillas de freno	0,13	Q4
Cadmio (Cd)	Revestimiento metálico	0,23	Q4
	Desgaste de las pastillas de freno	0,08	Q4
	Piezas de motor	0,05	Q4
Manganeso (Mn)	Escape	0,33	Q4
	Piezas de motor	0,23	Q4
Hierro (Fe)	Partes móviles del motor	0,95	Q1
	Estructuras de la autopista	0,93	Q1
	Óxido de la carrocería	0,45	Q3

Fuente: elaboración propia.

Finalmente, los resultados muestran que 0,70 g/km de sólidos podrían atribuirse directamente a las diferentes actividades vehiculares [83]. Así, Ekka [62] reporta que el desgaste del pavimento asfáltico contribuye con altas

concentraciones de metales pesados como Zn, Cd y Pb a la escorrentía vial.

3.2.3. Metodologías para evaluar el grado de contaminación

Los resultados muestran que la metodología de análisis granulométrico es la más empleada [58], con un índice medio de frecuencia de citación de 0,68 (Tabla 5). En orden de importancia, le siguen las metodologías de modelación numérica y simulación en laboratorio, las cuales se ubican en el segundo cuartil de citación; mientras que el análisis químico y la evaluación de impacto biológico pertenecen al cuartil Q3, lo cual sugiere que estas dos últimas metodologías no son usadas comúnmente para evaluar la presencia de metales pesados en las descargas de escorrentía sobre cuerpos hídricos [31]. En efecto, esta diversidad de metodologías permite evaluar el riesgo de contaminación por metales pesados en entornos viales con precisión.

Los hallazgos evidencian que se emplean diversas metodologías de evaluación [5], [84] y que su orden de importancia es el siguiente: análisis granulométrico (68%), modelización numérica (60%), simulaciones en laboratorio (56%), análisis químico (35%) e impacto biológico (24%) (Tabla 5). Otros estudios reportan hallazgos similares, en donde se identifica que el análisis granulométrico y la modelación numérica son las dos metodologías fundamentales para determinar el grado de contaminación por parte del escurrimiento vial en áreas urbanas [23], [26].

Los resultados sugieren que la metodología de análisis granulométrico es una metodología de evaluación eficaz para identificar las características físicas y químicas de los sedimentos, incluyendo el tamaño de las partículas y la composición mineralógica [85]. Estos análisis permiten determinar la abundancia y la distribución de los metales pesados en los sedimentos viales, lo que proporciona información valiosa sobre su origen y su potencial de liberación al medio ambiente [15], [86]. Los resultados insinúan también que la modelación numérica permite simular y predecir el comportamiento de los metales pesados en los sistemas hídricos, considerando variables tales como la hidrodinámica, los procesos de transporte y las interacciones químicas [33].

Tabla 5. Análisis continental de las metodologías de evaluación de metales pesados descargados en cuerpos hídricos

Metodología de evaluación	Continente	Índice medio (Q)	Cuartil medio
Análisis granulométrico	Asia	0,31	Q3
	África	0,32	Q3
	América	0,65	Q2
	Europa	0,91	Q1
	Mundial	0,53	Q2
Modelización numérica	Asia	0,11	Q4
	África	0,10	Q4
	América	0,32	Q3
	Europa	0,33	Q3
	Mundial	0,83	Q1
Simulación en laboratorio	Asia	0,30	Q3
	África	0,27	Q3
	América	0,82	Q1
	Europa	0,74	Q2
	Mundial	0,91	Q1
Análisis químico	Asia	0,56	Q2
	África	0,57	Q2
	América	0,97	Q1
	Europa	0,70	Q2
	Mundial	0,81	Q1
Evaluación del impacto biológico	Asia	0,38	Q4
	África	0,38	Q4
	América	0,82	Q1
	Europa	0,88	Q1
	Mundial	0,93	Q1

Fuente: elaboración propia.

En términos de la distribución continental de las metodologías, Europa se destaca como el de mayor diversidad, ya que presenta altos índices en todas las metodologías de evaluación detectadas [87]. En particular, Europa lidera en Análisis químico (0,70, Q2), simulaciones en laboratorio (0,74, Q2), y evaluación del impacto biológico (0,88, Q1). Esto sugiere una sólida investigación y aplicación de las diversas metodologías en Europa [88]. En contraste, Asia y África muestran índices más bajos y están ubicados principalmente en los cuartiles Q3 y Q4 [6], lo cual insinúa un menor uso de metodologías o una menor visibilidad de la investigación en estas regiones en comparación con Europa y América [81].

Adicionalmente, los hallazgos muestran que las metodologías empleadas para evaluar la presencia de metales pesados en sistemas hídricos mediante un análisis de los sedimentos y suelos aledaños resultaron adecuadas para determinar la contaminación en entornos viales urbanos [89], [47]. Esto es significativo ya que la contaminación por metales pesados en sedimentos viales

puede ser un problema de salud pública debido a su relación con las emisiones de los vehículos y el desgaste de las estructuras metálicas de edificios y la infraestructura urbana [16]. Por lo tanto, los resultados sugieren que el uso de estas metodologías en entornos viales puede contribuir a una mejor comprensión de la distribución espaciotemporal de los metales pesados en los sedimentos, lo que permite implementar medidas de control y mitigación adecuadas en áreas urbanas [90].

A partir de un análisis de componentes principales (Figura 1) entre las variables (Pr, RS, Hi, ST, MP, ES, EV), metales pesados (Ni, Zn, Cu, Cr, Pb) y metodologías de evaluación (SL, AQ, IB, MN, AG), se observó la existencia de tres componentes significativos (varianza total explicada = 82%, Figura 1). Los resultados mostraron que el comportamiento de las variables se dividió en tres componentes principales. El primer componente explicó el 32% de la varianza (color azul). En efecto, este componente asoció a los metales pesados y las principales variables asociadas dentro del marco de esta investigación: precipitación, evaluación del impacto biológico, escorrenría y análisis granulométrico. Este primer componente insinuó que, desde un punto de vista general, estas variables fueron las principales a considerar en el estudio de la descarga de metales pesados en cuerpos hídricos urbanos producto de la escorrenría.

Los hallazgos también mostraron dos componentes principales adicionales que explicaron el 29% (color rojo) y 21% (color verde) de la variación de los datos (Figura 1). En el segundo componente principal se asociaron las siguientes variables: Zn, Ni, sólidos totales, emisiones vehiculares, y simulación de laboratorio. Los resultados sugirieron que Zn y Ni fueron posiblemente los metales pesados mayoritarios en ambientes viales, y que su principal fuente fueron las emisiones vehiculares. Por último, también se sugirió el uso de los sólidos totales como una variable indicadora de la presencia de metales pesados en el escurrimiento vial durante las simulaciones realizadas en laboratorio.

En el tercer componente principal (color verde, Figura 1) se asociaron las siguientes variables: Cu, Pb, Cr, hidrocarburos, residuos sólidos y análisis químico. Los hallazgos sugirieron que existió un segundo grupo de metales pesados de interés (Cu, Pb y Cr), los cuales tuvieron una asociación significativa con los hidrocarburos.

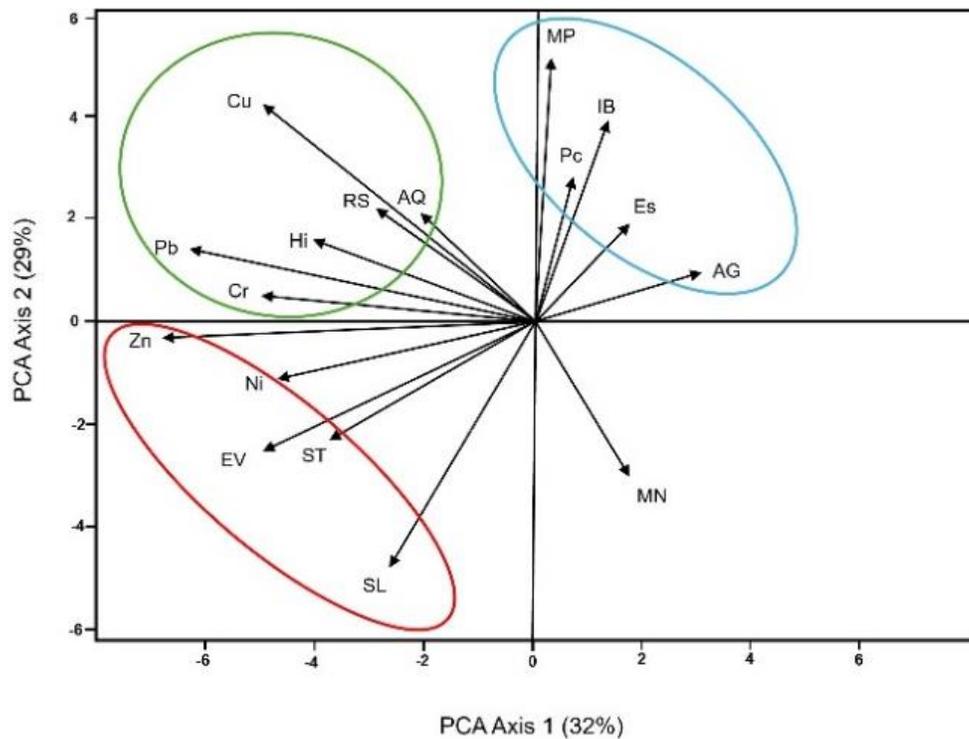


Figura 1. Análisis de componentes principales de las tres etapas de análisis bibliográfico de variables, contenidos y metodologías de evaluación (n = 42), nota: Pr: Precipitación, RS: Residuos sólidos, Hi: Hidrocarburos, ST: Sólidos Totales, MP: Metales pesados, Es: Escorrentía, EV: Emisiones vehiculares, Ni: Níquel, Zn: Zinc, Cu: Cobre, Cr: Cromo, Pb: Plomo, SL: Simulaciones de laboratorio, AQ: Análisis químico, IB: Evaluación del impacto biológico, MN: Modelación numérica, AG: Análisis granulométrico. Fuente: elaboración propia.

Así, el análisis químico posiblemente se destacó como el de mayor relevancia para el análisis de estos contaminantes en la escorrentía vial. Por último, se insinuó la relevancia de gestionar los residuos sólidos para posiblemente minimizar la descarga de metales pesados en cuerpos hídrico urbanos.

4. Conclusiones

Los resultados de este estudio permiten sugerir las variables clave a considerar durante el estudio de las descargas de metales pesados en sistemas hídricos urbanos por parte del escurrimiento vial (sedimentos viales). En términos generales las variables más significativas son las siguientes: precipitación ($Q = 0,83$), los sólidos totales ($0,70$) y los metales pesados ($0,61$). En orden de importancia, los metales pesados más significativos en el marco de este estudio son los siguientes: $Cr (0,68) > Pb (0,62) > Zn (0,62) > Ni (0,58) > Cu (0,57) > Cd (0,43) > Fe (0,14)$. En efecto, se insinúa al tráfico vehicular como la principal fuente de metales pesados en entornos viales. Se sugiere también explorar otras fuentes externas de metales pesados tales como las naturales e industriales, la influencia de la velocidad del

viento y la turbulencia inducida desde el tráfico vehicular.

En orden de importancia, las metodologías de evaluación de la contaminación por metales pesados descargados en sistemas hídricos urbanos son las siguientes: análisis granulométrico (68%) > modelización numérica (60%) > simulación en laboratorio (56%) > análisis químico (35%) > evaluación del impacto biológico (24%). Así, la metodología de análisis granulométrico posiblemente es fundamental para identificar características físicas y químicas del sedimento vial, revelando información sobre la abundancia y distribución de los metales pesados asociados con estos sedimentos viales.

La comparación de metodologías para la detección de metales pesados revela patrones distintivos según la región y el índice medio de citación (Q). El análisis granulométrico se destaca en Asia y África ($Q3$), mientras que en Europa muestra una frecuencia de citación superior ($Q1$). La modelización numérica tiene una frecuencia de citación inferior en Asia y África ($Q4$), pero se destaca globalmente ($Q1$). Las simulaciones en laboratorio sobresalen en América, Europa y a nivel

mundial (Q1), evidenciando su eficacia en entornos controlados de estudio. El análisis químico es consistentemente efectivo en América y globalmente (Q1), al igual que la evaluación del impacto biológico, que demuestra su uso significativo en América, Europa y mundialmente (Q1).

El análisis de componentes principales revela tres agrupamientos clave. El primer componente posiblemente resalta las principales variables a considerar durante el control y vigilancia de los metales pesados descargados en cuerpos hídricos urbanos bajo el contexto de esta investigación (sedimentos viales): precipitación (régimen climático), análisis granulométrico (caracterización de la contaminación) e impacto biológico. El segundo componente sugiere que los metales mayoritarios en ambientes viales son Zn y Ni, y que los sólidos totales pueden ser utilizados como posibles indicadores de la presencia de metales pesados en la escorrentía vial descargada sobre cuerpos hídricos. Por último, el tercer componente principal sugiere al análisis químico para complementar el análisis de otros metales pesados (Cu, Pb y Cr) y contaminantes (hidrocarburos) presentes en el escurrimiento vial. Se sugiere que las futuras investigaciones sobre esta materia podrían enfocarse en comprender las interacciones específicas entre los metales pesados detectados y la influencia de los factores climáticos, con el objeto de mejorar los modelos numéricos existentes.

Finalmente, este estudio es relevante para las instituciones encargadas de la vigilancia y control de la contaminación en áreas urbanas, con el objeto de visualizar estrategias que permitan reducir la contaminación por metales pesados descargada en los sistemas hídricos. No obstante, se desean resaltar las siguientes limitaciones detectadas durante el desarrollo de esta investigación: (1) La diversidad de técnicas empleadas para medir los metales pesados y los diferentes límites de detección pueden dificultar la comparación de resultados entre los estudios seleccionados. (2) Existen múltiples enfoques para evaluar el riesgo asociado a la exposición a metales pesados, lo que dificulta la comparación entre estudios. (3) La contaminación por metales pesados en sistemas hídricos urbanos tiene múltiples fuentes, lo que puede dificultar la identificación de las fuentes principales de contaminación.

Financiación

No aplica.

Contribución de los autores

J. Osorio-Sánchez: Curación de datos, Análisis formal, Redacción – borrador original, investigación. C. Zafra-Mejía: Conceptualización, Metodología, Supervisión, Redacción – revisión y edición. J. Suárez-López: Curación de datos, Recursos.

Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

Conflicto de interés

Los autores declaran que no tienen ningún conflicto de interés.

Declaración de la Junta de Revisión Institucional

No aplica.

Declaración de consentimiento informado

No aplica.

Referencias

- [1] RAMSAR, “Humedales: en peligro de desaparecer en todo el mundo,” 2018.
- [2] J. Beltrán, *Ecología de un humedal altoandino*. Bogotá, D.C: Editorial UD, 2016.
- [3] T. Salazar, “Generación de un modelo de monitoreo de la contaminación atmosférica por metales pesados en zonas de flujo vehicular, basado en las propiedades magnéticas de biomonitores y polvo urbano,” tesis doctoral, Tecnológico de Costa Rica, 2023.
- [4] J. A. Díaz-Martínez, C. A. Granada-Torres, “Effect of anthropic activities on the physicochemical and microbiological characteristics of the Bogotá River along the municipality of Villapinzón-Cundinamarca,” *Rev. Fac. Med.*, vol. 66, no. 1, pp. 45–52, 2018, doi: <http://dx.doi.org/10.15446/revfacmed.v66n1.59728>
- [5] L. Londoño, P. Londoño, F. Muñoz, “Los riesgos de los metales pesados en la salud humana y animal,” *Bioteología en el Sect. Agropecu. y Agroindustrial*, vol. 14, no. 2, p. 145, 2016, doi: [https://doi.org/10.18684/BSAA\(14\)145-153](https://doi.org/10.18684/BSAA(14)145-153)
- [6] H. M. Haynes, K. G. Taylor, J. Rothwell, P. Byrne, “Characterisation of road-dust sediment in urban

- systems: a review of a global challenge,” *J. Soils Sediments*, vol. 20, no. 12, pp. 4194–4217, 2020, doi: <https://doi.org/10.1007/s11368-020-02804-y>
- [7] N. Vidal, H. Acosta, F. Villacres, “Determinación de metales pesados en los cuerpos de agua del Área de Conservación Regional Humedales de Ventanilla, Región Callao, Perú,” *Rev. del Inst. Investig. la Fac. Ing. Geológica, Minera, Metal. y Geográfica*, vol. 20, no. 39, pp. 149–158, 2018, doi: <https://doi.org/10.15381/iigeo.v20i39.14177>
- [8] D. S. Castañeda, J. A. Méndez, “Estimación de la relación entre material particulado PM10 atmosférico y el susceptible de resuspensión en algunas vías de Bogotá,” trabajo de grado, Universidad de la Salle, 2018.
- [9] M. Zubero, J. Aurrekoetxea, J. Ibarluzea, et al. “Metales pesados (Pb, Cd, Cr Y Hg) en población general adulta próxima a una planta de tratamiento de residuos urbanos de Bizkaia,” *Rev. Esp. Salud Publica*, vol. 82, no. 5, 481-492, 2008.
- [10] L. Cruz García, J. Carreón Guillén, J. Hernández Valdés, M. Montero López, J. Bustos Aguayo, “Actitudes, consumo de agua y sistema de tarifas del servicio de abastecimiento de agua potable,” *Rev. Latinoam.*, vol. 34, 2013.
- [11] S. Fernández, Y. Medina, and C. Velandia, “Estudio hidrogeológico para el uso de agua subterránea,” trabajo de grado, Universidad Católica de Colombia, 2019.
- [12] V. B. Molina, “El servicio público domiciliario de agua potable en Colombia y el mundo,” trabajo de grado, Universidad de Cartagena, 2010.
- [13] C. Baena, “Evaluación del aprovechamiento de recursos hídricos no convencionales en la vivienda urbana,” trabajo de grado, Universidad Tecnológica de Pereira, 2016.
- [14] D. Rodriguez and M. Rodriguez, “Evaluación En La Gestión Del Impacto Ambiental En El Humedal La Vaca- Kennedy,” Universidad Católica de Colombia, 2017.
- [15] S. Pabón, R. Benítez, R. Sarria, J. Gallo, “Contaminación del agua por metales pesados, métodos de análisis y tecnologías de remoción,” *Entre Cienc. e Ing.*, vol. 14, no. 27, pp. 9–18, 2020, doi: <https://doi.org/10.31908/19098367.0001>
- [16] O. Cano, “Identificación Preliminar Del Aporte De Fuentes Del Material Particulado Susceptible De Resuspensión En Vías De Bogotá,” trabajo de grado, Universidad de La Salle. p. 100, 2017.
- [17] C. Fuentes Nieto, C. C. López Velandia, “Análisis de las transformaciones en las coberturas del humedal urbano Tibanica, localidad de Bosa, Bogotá D. C.,” *Territorios*, no. 43, pp. 1–24, 2020, doi: <https://doi.org/10.12804/revistas.urosario.edu.co/territorios/a.7951>
- [18] J. Bezerra, R. Batista, and P. C. Silva, “Caracterização do processo de poluição dos sedimentos do rio apodi-mossoró no trecho urbano de mossoró-rn,” *Soc. Nat.*, vol. 30, no. 3, pp. 108–126, 2019, doi: <https://doi.org/10.14393/SN-v30n3-2018-6>
- [19] V. Taborda, D. Gianello, I. Aguer, M. Celeste, C. Minaglia, “Importancia de la conservación de las lagunas urbanas pampeanas”, Congreso *Internacional Aguas, Ambiente y Energía de la Asociación de Universidades Grupo Montevideo*, pp. 346-350, 2017.
- [20] E. Herrera, “Revisión bibliográfica sobre estudios de sedimentos en el rio Bogotá,” trabajo de grado, Universidad Militar de Colombia, 2019.
- [21] M. Y. Hanfi, M. Y. A. Mostafa, M. V. Zhukovsky, “Heavy metal contamination in urban surface sediments: sources, distribution, contamination control, and remediation,” *Env. Monit Assess*, vol. 129, 2020, doi: <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7947-5>
- [22] S. Huang, C. Chen, P. R. Jaffé, “Seasonal distribution of nitrifiers and denitrifiers in urban river sediments affected by agricultural activities,” *Science of The Total Environment*, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.116>
- [23] L. Rueda, “Análisis granulométrico de carga de sedimento en vías pavimentadas por medio de metodología EPA AP-42,” trabajo de grado, Universidad de la Salle, 2019.
- [24] J. V. Illapa Apugllón, C. A. Betún Guamán, “Determinación de metales pesados en sedimentos de las

lagunas Colta y Magtayán,” trabajo de grado, Universidad Nacional de Chimborazo, Ecuador, 2023.

[25] J. Khan, M. Ketzel, K. Kakosimos, M. Sørensen, S. S. Jensen, “Road traffic air and noise pollution exposure assessment – A review of tools and techniques,” *Sci. Total Environ.*, vol. 634, pp. 661–676, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.374>

[26] M. Cusipuma, J. M. Kuroiwa, and L. F. Castro, “Simulación numérica de la hidrodinámica y transporte de sedimentos en el modelo hidráulico del río Madre De Dios,” Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Buenos Aires, Argentina, 2018.

[27] A. C. Gamboa, C. Pinto, G. Gutiérrez, I. Ramírez, “Basura plástica y microplásticos: contaminantes emergentes presentes en sedimentos de una playa urbana del oriente venezolano,” *Ciencia e Ingeniería*, enero-junio, vol. 9, p. 6706296, 2022, doi: <https://www.doi.org/10.5281/zenodo.6706296>

[28] S. Rojas, G. Aguilar, B. Sepúlveda, O. Pavez, “Dynamics of copper, lead, mercury and arsenic concentration in sediments of the copiapó river, Chile,” *Rev. Int. Contam. Ambient.*, vol. 35, no. 2, pp. 361–370, 2019, doi: <https://doi.org/10.20937/rica.2019.35.02.08>

[29] J. Cabrera Drouet, “Assessment of heavy metals contamination in sediments and soils of Biological Reserve Limoncocha-Ecuador by pollution indices,” trabajo de grado, Universidad de Cantabria, 2018.

[30] M. Garcia, D. Ruiz, “Modelación Hidrodinámica Y De Calidad Del Agua En Dos Dimensiones Del Cuerpo Hídrico Léntico Zona Sur Del Humedal Capellania, Localidad De Fontibon, Bogotá D.C. Colombia Con El Software Iber,” trabajo de grado, Universidad Santo Tomás, 2018.

[31] M. Leyva, “Capacidad secuestradora de metales pesados en el sedimento del humedal alto andino Collotacocha - Canrey - Recuay - Ancash, periodo abril - setiembre 2015,” trabajo de grado, Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo, 2015.

[32] D. L. Alonso, V. M. Pabón, G. A. Parrado, J. C. Parada, “Revisión sobre la producción de radionúclidos en reactores nucleares y sus aplicaciones como radiotrazadores,” *Rev. Investig. y Apl. Nucl.*, pp. 6–23, 2017.

[33] G. Vázquez, J. Ortiz, and L. Lizárraga, “Efecto de las tecnologías de bajo impacto en el tratamiento del agua de escorrentía urbana,” *Vivienda y Comunidades Sustentables*, no. 8, pp. 103–115, 2020, doi: <https://doi.org/10.32870/rvcs.v0i8.151>

[34] A. Millar, “Evaluación de la concentración de los metales pesados Cd, Cu, Pb y Zn en sedimentos superficiales del estero Quilacoya, Hualqui,” trabajo de grado, Universidad Católica de la Santísima Concepción, 2022.

[35] J. A. C. Fernández, “Aplicación de un modelo de dispersión atmosférica,” trabajo de grado, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, 2012.

[36] R. Hartman, *La jerarquía de los valores*. Fondo de Cultura Económica, 1959.

[37] M. Rendón-Macías, M. Villasís-Keever, and M. Miranda-Novales, “Estadística descriptiva,” *Revista Alergia México*, vol. 63, no. 4, pp. 397-407, 2016.

[38] L. Campos Rodrigues et al., “Análisis estadístico, seguimiento y prevención de la presencia de metales pesados en las depuradoras de Granollers, La Llagosta y Montornès del Vallès,” *Tecnoaqua*, vol. 51, pp. 54-58, 2021.

[39] C. Arango, J. Dorado, D. Guzmán, J. Ruíz, “Variabilidad climática de la precipitación en Colombia asociada al ciclo el niño, la niña – oscilación del sur (ENSO),” 2013.

[40] J. L. Lugo, E. R. Lugo Arias, J. B. Vergara, D. A. Crespo Tovar, and J. C. Mercado, “Efectos del cambio climático sobre las tasas de transporte de sedimentos en grandes ríos,” *Tendencias en la Investigación Universitaria Una visión desde Latinoamérica*. 2019.

[41] A. R. Claros, “La condición vulnerable y solidaria de la vida humana: un análisis crítico del pensamiento de MacIntyre,” *Rev. Filos. UIS*, vol. 17, no. 2, pp. 161–178, 2018.

[42] A. P. Davis, M. Shokouhian, S. Ni, “Loading estimates of lead, copper, cadmium, and zinc in urban runoff from specific sources,” *Chemosphere*, vol. 44, no. 5, pp. 997–1009, 2001, doi: [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(00\)00561-0](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(00)00561-0)

- [43] D. Martincic, Z. Kwokal, M. Branica, “Distribution of zinc, lead, cadmium and copper between different size fractions of sediments,” *Sci. Total Environ.*, vol. 95, pp. 201–215, 1990, doi: [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(90\)90065-3](https://doi.org/10.1016/0048-9697(90)90065-3)
- [44] M. Espechit Valério, “Caracterização geoquímica do complexo mosenhor isidro através da análise química de sedimentos de corrente,” trabajo de grado, Universidade Federal de Ouro Preto, 2023.
- [45] J. Bezerra, R. Batista, P. C. Silva, “Caracterização do processo de poluição dos sedimentos do rio apodimossoró no trecho urbano de Mossoró-RN,” *Soc. Nat.*, vol. 30, no. 3, pp. 108–126, 2019, doi: <https://doi.org/10.14393/SN-v30n3-2018-6>
- [46] A. Aguilar Daniela et al., “Evaluación de la presencia de metales pesados en los sedimentos del río de Cata,” *Jóvenes en la Ciencia*, vol. 21, pp. 1–5, 2023.
- [47] A. Salgado, “Niveles de contaminación por congestión vial en ciudades urbanas. una revisión sistemática entre 2009 - 2019,” trabajo de grado, Universidad Privada del Norte, 2020.
- [48] K. Marca, “Bioindicadores para identificar la presencia de PM, NOX, CO2, Fe y Cu atmosféricos: Revisión sistemática”, trabajo de grado, Universidad Cesar Vallejo, 2022.
- [49] J. A. Gómez H, O. Leone, J. Villalaz, I. Goti, “Metales Trazas (Cu, Cd, Pb) En Agua, Sedimento Y Tejido Blando De Leukoma Asperimma (Lamellibranchia: Veneridae), En La Playa Bique, Pacifico De Panamá,” *Tecnociencia*, vol. 25, no. 2, pp. 229–255, 2023, doi: <https://doi.org/10.48204/j.tecno.v25n2.a4074>
- [50] M. Cartagena, “Biorremediación en aguas residuales contaminadas con cianuro y mercurio generadas en el proceso de la minería aurífera en Colombia, a partir de una revisión bibliográfica entre los años 2008 - 2018,” trabajo de grado, Universidad de Antioquia, 2019.
- [51] A. Ligrone Gianda, “Evaluación de Impacto Ambiental en Uruguay: revisión crítica y aportes desde la Ecología,” trabajo de grado, Universidad de la República de Uruguay, 2017.
- [52] P. Restrepo, W. Andrés, “Tendencias del análisis de fitolitos en Colombia. Una revisión crítica de la sistemática y las metodologías desde una perspectiva arqueológica,” *Boletín de Antropología Universidad de Antioquia*, vol. 29, no. 48, pp. 164–186, 2014.
- [53] G. García-León, J. Beltrán-Vargas, C. Zafra-Mejía, “Modelación dinámica del comportamiento hidrológico de un humedal urbano bajo condiciones del fenómeno ENSO,” *Rev. U.D.C.A Actual. Divulg. Científica*, vol. 23, no. 2, 2020, doi: <https://doi.org/10.31910/rudca.v23.n2.2020.1750>
- [54] M. Huber and B. Helmreich, “Stormwater management: Calculation of traffic area runoff loads and traffic related emissions,” *Water*, vol. 8, no. 7, 2016, doi: <https://doi.org/10.3390/w8070294>
- [55] N. Vallina Pita, C. Costales-Campa, R. Fernández Carrio, F. Robleda Álvarez, and L. Á. Sañudo Fontaneda, “Los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible y el nuevo paradigma del diseño de las calles verdes para la gestión de las aguas pluviales: Una propuesta para la ciudad histórica de Oviedo,” *Rev. Ing. Obras Civiles*, vol. 8, no. 2, pp. 35–44, 2018.
- [56] D. Aguilar, A. Díaz, B. Ortega, M. F. Lira, and M. López, “Evaluación de la presencia de metales pesados en los sedimentos del río de Cata,” *Jóvenes en la Ciencia*, vol. 21, pp. 1–5, 2023.
- [57] V. Barrera and Z. Cornejo, “Revisión Sistemática: Tecnologías Biológicas para el Tratamiento de Aguas Contaminadas por Cadmio (II) y Plomo (II),” trabajo de grado, Universidad Cesar Vallejo, 2020.
- [58] A. V. Goya-Heredia, C. A. Zafra-Mejía, and J. P. Rodríguez-Miranda, “Tendencias metodológicas en la evaluación del grado de contaminación y de riesgos por metales pesados presentes en sedimentos viales urbanos,” *Rev. UIS Ing.*, vol. 19, no. 4, pp. 133–148, 2020, doi: <https://doi.org/10.18273/revuin.v19n4-2020012>
- [59] M. Huber, A. Welker, and B. Helmreich, “Critical review of heavy metal pollution of traffic area runoff: Occurrence, influencing factors, and partitioning,” *Sci. Total Environ.*, vol. 541, pp. 895–919, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.09.033>
- [60] S. J. Lezama Tisnado and M. M. Rodríguez De La Sota, “Una revisión de los Sistemas de Drenaje Urbano Sostenible (SUDS) aplicados a nivel mundial,” trabajo de grado, Universidad Cesar Vallejo, 2020.

- [61] R. Miranda, “Revisión Panorámica del uso del Pasto Vetiver en Restauración de Taludes como Técnica de Bioingeniería del Suelo,” trabajo de grado, Universidad Jorge Tadeo Lozano, vol. 1, pp. 2–119, 2016.
- [62] S. A. Ekka, H. Rujner, G. Leonhardt, G. T. Blecken, M. Viklander, W. F. Hunt, “Next generation swale design for stormwater runoff treatment: A comprehensive approach,” *J. Environ. Manage.*, vol. 279, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111756>
- [63] H. Gómez, R. Fernández, Z. Benzo, F. Galarraga, J. Hernández, and A. Roschman-González, “Líquenes como biomonitores de la contaminación atmosférica por hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) - Revisión,” *Rev. la Fac. Ing. UCV*, vol. 28, no. 1, pp. 45–58, 2013.
- [64] L. Calva, M. Torres, “Metales pesados y sus efectos en organismos,” *Contactos*, vol. 51, pp. 33–42, 2004.
- [65] I. Calixto, “Cambios de uso de suelo y ecología vial en la Amazonía peruana: una revisión crítica,” trabajo de grado, Pontificia Universidad Católica de Perú, 2019.
- [66] A. M. Germán Gómez, H. Aponte, and V. Moscoso Villacorta, “Peru’s marine-coastal decapods (Crustacea): Effectiveness of PNAs and challenges for their protection,” *South Sustain.*, vol. 1, p. e024, 2020, doi: <https://doi.org/10.21142/SS-0102-2020-024>
- [67] L. Duque, A. Forero, “Análisis de la Contaminación Ambiental y Efectos Sobre la Salud Pública por el Uso de Pavimentos en Áreas Urbanas: una Revisión Bibliográfica Mundial,” trabajo de grado, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2017.
- [68] V. Merlo, G. Soto, “Tipos de drenaje usados en ciudades importantes a nivel nacional e internacional: una revisión sistemática,” trabajo de grado, Universidad Privada del Norte, 2020.
- [69] S. Muñoz Pérez, J. Salcedo Reátegui, and A. Sotomayor Mendoza, “Contaminación ambiental producida por el tránsito vehicular y sus efectos en la salud humana: revisión de literatura,” *Inventum*, vol. 16, no. 30, pp. 20–30, 2021, doi: <https://doi.org/10.26620/uniminuto.inventum.16.30.2021.20-30>
- [70] M. Kayhanian, C. Suverkropp, K. Tsay, “Characterization and prediction of highway runoff constituent event mean concentration,” *J. Environ. Manage.*, vol. 85, no. 2, pp. 279–295, 2007.
- [71] M. Kayhanian, E. R. McKenzie, J. E. Leatherbarrow, T. M. Young, “Characteristics of road sediment fractionated particles captured from paved surfaces, surface run-off and detention basins,” *Sci. Total Environ.*, vol. 439, pp. 172–186, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.08.077>
- [72] V. J. Fernandez, “Implantación de técnicas de drenaje sostenible de escorrentías de autopistas (TDSEA) en la comunidad autónoma de Galicia,” trabajo de grado, Universidade da Coruña, 2015.
- [73] K. Chaparro, “Análisis De Plomo En Sedimento Y Raíz De Rhizophoramangle En Un Tramo Del Estero Salado Del Cantón Guayaquil, Provincia Del Guayas,” trabajo de grado, Universidad de Guayaquil, 2022.
- [74] J. Hilario, “Concentración De Metales Pesados: Arsénico, Cadmio, Cobalto, Cromo, Mercurio Y Plomo En Sedimentossuperficiales En La Laguna De Pultoc-Huancavelica,” trabajo de grado, Universidad Huancavelica, 2022.
- [75] T. Salazar Rojas, G. Calvo Brenes, F. Cejudo, M. Vinicio Gutiérrez Soto, “Generación de un modelo de monitoreo de la contaminación atmosférica por metales pesados en zonas de flujo vehicular, basado en las propiedades magnéticas de biomonitores y polvo urbano,” tesis doctoral, Tecnológica de Costa Rica, 2023.
- [76] K. Aquino and C. Checconi, “Revisión Sistemática Técnicas de Remediación para Suelos Contaminados por Metales Pesados,” trabajo de grado, Universidad Cesar Vallejo, 2020.
- [77] C. Zafra, N. Peña, and S. Álvarez, “Contaminación por metales pesados en los sedimentos acumulados sobre el corredor vial Bogotá - Soacha,” *Rev. Tecnura*, vol. 17, no. 37, p. 99, 2013.
- [78] E. Martínez, “Estudio de superficies urbanas multifuncionales de hormigón poroso,” Universidad de Cantabria, 2020.
- [79] A. Müller, H. Österlund, J. Marsalek, and M. Viklander, “The pollution conveyed by urban runoff: A review of sources,” *Sci. Total Environ.*, vol. 709, p. 136125, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136125>

- [80] A. Serrano, “Mecanismo de acción de diversas técnicas remediadoras de contaminantes orgánicos persistentes en el suelo: Revisión Sistemática,” trabajo de grado, Univ. Andin. del Cusco, pp. 1–118, 2021.
- [81] C. Mejía, E. Pinzón, J. González, “Influencia del tráfico en la acumulación de metales pesados sobre vías urbanas: Torrelavega (España)-Soacha (Colombia),” *Rev. Fac. Ing.*, no. 67, pp. 146–160, 2013.
- [82] I. Amable, J. Méndez, B. Bello, B. Benítez, L. Escobar, and R. Zamora, “Influencia de los contaminantes atmosféricos sobre la salud,” *Rev. Med. Electrón.* vol. 39, no.5, 2017.
- [83] M. Kayhanian, B. D. Fruchtman, J. S. Gulliver, C. Montanaro, E. Ranieri, S. Wuertz, “Review of highway runoff characteristics: Comparative analysis and universal implications,” *Water Res.*, vol. 46, no. 20, pp. 6609–6624, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.07.026>
- [84] Y. Noriega, J. Vives, S. Muñoz, “Uso de estabilizadores de suelo: una revisión del impacto al corte y asentamiento,” *Avances Investigación En Ingeniería*, vol. 18, no. 1, pp. 1–15, 2022, doi: <https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.1.6856>
- [85] J. Anta, E. Peña, and J. Suárez, “Un proceso de selección de BMP basado en la granulometría de los sólidos de escorrentía en una cuenca urbana independiente,” trabajo fin de master, Universidad Politécnica de Cartagena, 2007.
- [86] M. Mena, X. Perez, “Capacidad adsorbente de metales pesados utilizando materiales Lignocelulósicos en aguas contaminadas: Revisión sistemática,” trabajo de grado, Universidad Cesar Vallejo, 2021.
- [87] F. Xia et al., “Distribution and source analysis of heavy metal pollutants in sediments of a rapid developing urban river system,” *Chemosphere*, vol. 207, pp. 218–228, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.05.090>
- [88] A. Alonso, P. Castro-Díez, “El caracol acuático neozelandés del cieno (*Potamopyrgus antipodarum*): impactos ecológicos y distribución de esta especie exótica en la península ibérica,” *Ecosistemas*, vol. 24, no. 1, pp. 52–58, 2014, doi: <https://doi.org/10.7818/ECOS.2015.24-1.09>
- [89] C. Zafra, L. Rodríguez, and Y. Torres, “Metales pesados asociados con las partículas atmosféricas y sedimentadas de superficies viales: Soacha (Colombia),” *Rev. científica*, vol. 1, no. 17, p. 113, 2013, doi: <https://doi.org/10.14483/23448350.4571>
- [90] G. Sven, B. Cervantes, C. Hevia, D. P. Puente, M. Magdalena, and C. Cortés, “Intervención hidráulica para controlar la contaminación y prevenir el riesgo hidrometeorológico en el río Eslava, D.F. Hydraulic intervention to control of pollution and prevent hydrometeorological risk in the river Eslava in,” *Rev. Conscienc. Tecnológica*, 2013.