

# Metales pesados (Hg, As, Cd, Zn, Pb, Cu, Mn) en un trayecto del río Cauca impactado por la minería de oro.



Revista EIA  
ISSN 1794-1237  
e-ISSN 2463-0950  
Año XIX/ Volumen 19/ Edición N.37  
Enero-Junio de 2022  
Reia37005 pp. 1-17

Publicación científica semestral  
Universidad EIA, Envigado, Colombia

✉ GERMÁN ENAMORADO-MONTES<sup>1</sup>  
JESÚS TIRADO-MONTOYA<sup>1</sup>  
JOSÉ MARRUGO-NEGRETE<sup>1</sup>

## PARA CITAR ESTE ARTÍCULO / TO REFERENCE THIS ARTICLE /

Enamorado-Montes, G.; Tirado-Montoya, J.; Marrugo-Negrete, J. (2022). Metales pesados (Hg, As, Cd, Zn, Pb, Cu, Mn) en un trayecto del río Cauca impactado por la minería de oro. Revista EIA, 19(37), Reia37005. pp. 1-17. <https://doi.org/10.24050/reia.v19i37.1481>

### ✉ Autor de correspondencia:

Enamorado-Montes, G. (Germán):  
Químico, Magister en Ciencias Ambientales, Universidad de Córdoba.  
Correo electrónico:  
genamoradomontes@correo.unicordoba.edu.co

**Recibido:** 13-11-2020  
**Aceptado:** 27-04-2021  
**Disponible online:** 01-01-2022

1. Universidad de Córdoba, Departamento de Química,  
Grupo de Aguas Química Aplicada y Ambiental.

## Resumen

En el presente estudio se realizó una evaluación de la concentración de metales pesados (Hg, As, Cd, Zn, Pb, Cu, Mn) en agua y sólidos suspendidos totales para un tramo del río Cauca en dos temporadas (seca - lluvias). En el tramo estudiado, desde Caucasia (Antioquia) hasta Achí (Bolívar) fueron seleccionadas 13 estaciones de muestreo. Para los sólidos suspendidos el orden decreciente de los metales fue Mn>Zn>Cu>Pb>As>Hg>Cd y para el agua fue Mn>Hg>Pb>As>Cd. Al realizar la comparación con los límites de concentración máximos permitidos de la organización mundial de la salud, se concluyó que solo tres metales superaban la concentración permitida los cuales fueron Hg, Pb y Mn respectivamente, para el mercurio se encontró que el valor medio fue de 83 µg/L lo cual es un valor muy por encima del rango permitido, para el plomo 2 de las 13 estaciones de muestreo, asociadas al río Nechí, superaron el límite máximo permitido, para el Mn en cada una de las estaciones de muestreo se sobrepasó el umbral de 400 µg/L. Las fuentes de estos contaminantes son de tipo antropogénico, posiblemente asociadas a actividades mineras y agrícolas características del área de estudio.

**Palabras Claves:** *Bajo Cauca, contaminación del recurso hídrico, metales pesados, minería*

# Heavy metals (Hg, As, Cd, Zn, Pb, Cu, Mn) in a stretch of Cauca river impacted by gold mining.

## Abstract

In the present study, an evaluation of the concentration of heavy metals (Hg, As, Cd, Zn, Pb, Cu, Mn) in water and total suspended solids was carried out for a stretch of the Cauca River in two seasons (dry - rainy). The Cauca river section studied, from Caucasia (Antioquia) to Achí (Bolívar), 13 sampling stations were selected. For suspended solids the decreasing concentration order of metals was Mn > Zn > Cu > Pb > As > Hg > Cd and for water it was Mn > Hg > Pb > As > Cd. Comparison with the maximum allowable limits of the World Health Organization concluded that only three metals, Hg, Pb and Mn, exceeded the allowable concentration. Average mercury value was 83 µg/L which is a value well above the permissible range, for lead 2 of the 13 sample stations associated with the Nechí River exceeded the maximum allowable limit, on the other hand, Mn in each of the sampling stations exceeded the threshold limits of 400 µg/L. The sources of these pollutants are anthropogenic, possibly associated with mining and agricultural activities characteristic of the study area.

**Key Words:** *Bajo Cauca, heavy metals, mining, water pollution.*

## Introducción

El sexto objetivo de desarrollo sostenible es garantizar la disponibilidad de agua, su gestión sostenible y el saneamiento para todos. Una de las metas trazadas para lograrlo en el año 2030 consiste en mejorar la calidad del agua mediante la reducción de la contaminación (PNUD, 2016). Lo anterior denota claramente que existe una preocupación mundial por la presión que se está ejerciendo sobre las fuentes de agua por causa de la contaminación. Los principales contaminantes del agua incluyen nutrientes, patógenos, metales pesados y contaminantes orgánicos que se encuentran en los desechos y aguas residuales de los seres humanos y actividades económicas como la agricultura, la industria, la minería y otros sectores como la industria farmacéutica (UN-Water, 2016).

Los metales pesados como el mercurio (Hg), cobre (Cu), plomo (Pb), manganeso (Mn) cadmio (Cd), arsénico (As) y zinc (Zn) poseen la capacidad de bioacumularse y biomagnificarse en la red trófica; en los ecosistemas acuáticos pueden encontrarse en los sedimentos, en los sólidos en suspensión y en el agua, pasando a las plantas, animales y finalmente a los seres humanos, de esta manera la contaminación del recurso hídrico se puede convertir en un problema de salud pública (Romero et al., 2011). Existen casos emblemáticos sobre los efectos de algunos metales pesados en la salud humana, en países como Japón el desastre de Minamata evidenció las afectaciones causadas por la exposición Hg causando daños irreversibles a parte de la población expuesta a los contaminantes (Matsuyama et al., 2017).

El río Cauca es el segundo río más importante de Colombia después del río Magdalena; en su cuenca baja se desarrolla una intensa actividad de minería de oro (IDEAM, 2019). Actualmente, el Bajo Cauca antioqueño es una de las zonas de mayor producción de oro en Colombia, encontrándose sitios de extracción minera plenamen-

te identificados los cuales operan con permisos mineros (UNODC, 2016). Sin embargo, cabe resaltar que también se presenta minería informal en la cual no se da el adecuado tratamiento de residuos contaminantes, todos estos vertimientos son drenados directamente al río Cauca (Correa et al. 2017).

Los ecosistemas de la zona estudiada podrían estar siendo deteriorados, dadas las actividades productivas principalmente de minería que se realizan en el entorno, las cuales estarían afectando a las especies que tienen contacto directo o indirecto con el agua contaminada del río (UPME-UNICOR, 2015). Un problema puntual es la presencia de metales pesados en el río, los cuales son vertidos a la corriente del río y por la dinámica misma del sistema son transportados, acumulándose en animales y plantas, lo que conduce a su biomagnificación (Guiza et al., 2013).

Para cumplir con el objetivo de la investigación se realizó una evaluación de la concentración de metales pesados en agua y en los sólidos suspendidos en el tramo del río Cauca que comprende Caucasia y Achí, presumiblemente impactado por metales pesados procedentes de la actividad minera, de esta manera se determinó la afectación por estos tóxicos y el riesgo que representa para el ecosistema.

## **Materiales y métodos**

### *Área de estudio*

El río Cauca es la segunda arteria fluvial más importante del país el cual tiene 1.350 km de recorrido desde su nacimiento en la laguna del Buey en el macizo colombiano hasta su desembocadura en el río Magdalena cerca de la población de Pinillos en Bolívar, tiene influencia directa en más de 180 municipios, su cuenta hidrográfica es de aproximadamente 63.000 km<sup>2</sup>, en la cual se practica explotación minera, agrícola, ganadera, entre otras (Pérez-Valbuena et al., 2015). La zona de estudio comprende parte baja del Cauca Antioqueño y de La Mojana sucreña; el sector posee un clima cálido tropical, con influencia de zonas montañosas y zonas planas de bosque seco tropical (figura 1), específicamente el tramo del río entre los municipios de Caucasia (departamento de Antioquia) y Achí (departamento de Bolívar), de esta manera se abarcaron otros municipios como Nechí (Antioquia), San Jacinto del Cauca y Montecristo (Bolívar) y Guaranda (Sucre). En esta sección del río Cauca sus principales tributarios son el río Nechí y el río Caribona. En el río Nechí se da una alta actividad minera con las siguientes cantidades extraídas en promedio anualmente: Bajo Nechí tendría la mayor producción de oro, 5.623 kg/año, Nechí medio, 2.341 kg/año y, Alto Nechí, 873 kg/año (Monroy et al., 2016). En la zona de influencia de río Caribona se encuentran betas de oro y plata las cuales son explotadas en su mayoría de forma artesanal, se estima que se producen anualmente 7.326 kg/año, aunque la minería decrece año a año en esta región sigue siendo en la actualidad la actividad legal de mayor envergadura, pero por su práctica en forma artesanal, el alto impacto ambiental y los altos costos operacionales, ha perdido competitividad en el mercado minero (CSB, 2007).

### *Estaciones de muestreo*

Se seleccionaron un total de 13 estaciones de muestreo entre Caucasia y Achí, como se muestra en la figura 1. Estación P1 correspondiente al casco urbano de Achí, P2 en el casco urbano de Guaranda, P3 después de la desembocadura del río Caribona

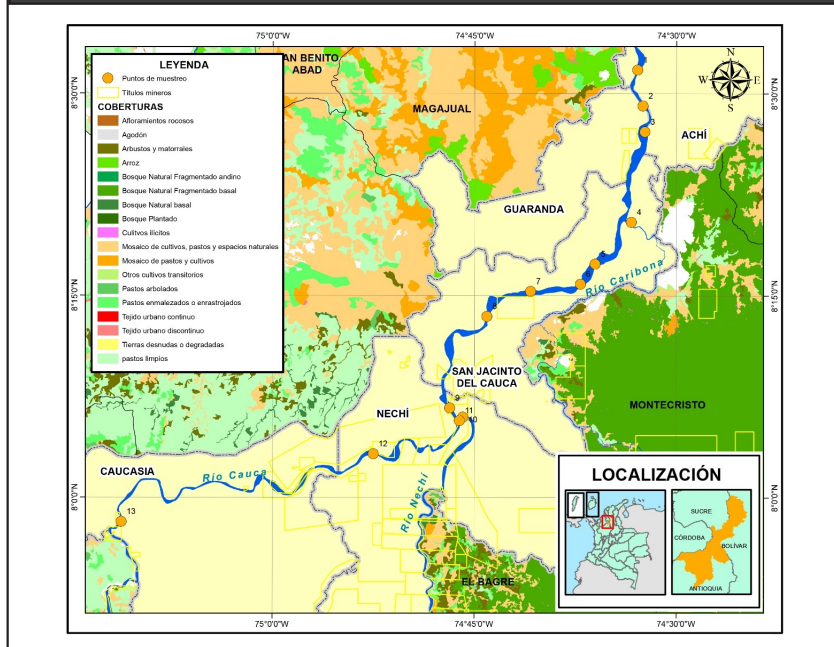
en el río Cauca en zona rural de Montecristo, P4 en el río Caribona justo antes de la desembocadura al río Cauca, P5: Galindo, P6: Tenche, P7: San Jacinto, P8 después de la desembocadura del río Nechí en el río Cauca, P9 en el río Nechí justo antes de la desembocadura al río Cauca, P10 en el casco urbano de Nechí, P11 Antes de Nechí en zona rural de Caucasia, P12: Corregimiento Colorado en Caucasia, P13 en el casco urbano de Caucasia.

Para escoger el área de estudio fue importante en primera instancia tener en cuenta que en esta zona no existen investigaciones sobre metales pesados aún cuando se ha presentado históricamente una gran cantidad de actividad minera en este trayecto del río Cauca, sobre esta zona se encuentran dos grandes distritos mineros como son el distrito minero Nordeste Antioqueño y el distrito minero San Martín de Loba (UPME, 2004).

### *Muestreo de aguas y sólidos suspendidos totales*

El muestreo incluyó dos períodos climáticos, uno lluvioso en el mes de enero de 2019 y otro seco en el mes de marzo de 2019. Cada sitio fue georreferenciado empleando un equipo GPS Garmin Etrex 10. Las muestras de agua fueron recolectadas con botella horizontal tipo Van Dorn y almacenadas en frascos de polietileno previamente lavados con etran, enjuagados con agua desionizada y purgados con agua acidulada al 5% (HNO<sub>3</sub>). Por cada sitio de muestreo, se tomaron 2 muestras de 1L, una muestra para el análisis de los metales pesados en agua (preservación con 1mL de HNO<sub>3</sub>) y otra muestra para la determinación de los metales pesados en la fase particulada (sin preservación). Todas las muestras fueron refrigeradas a 4,0 °C y trasladadas al Laboratorio de Toxicología y Gestión Ambiental de la Universidad de Córdoba para su análisis. Se realizaron determinaciones in situ de pH y Temperatura mediante un medidor Hanna HI9126, equipado con una sonda HI1230B

**Figura 1.** Área de estudio con la ubicación de los sitios de muestreo en el río Cauca, trayecto Achí-Caucasia.



Para obtener el material particulado del agua (sólidos suspendidos totales), se filtró al vacío un volumen de 1L de agua empleando filtros de éster de celulosa de 0,45 micras y 47 mm de diámetro marca Advantec MSF. Los filtros se secaron en una estufa ED Binder a 40 °C, durante aproximadamente 8 horas hasta peso constante, el sólido adherido sobre la superficie del filtro fue cuidadosamente retirado usando micro-espátula de plástico (Song et al., 2010). Finalmente, el material recuperado fue macerado y tamizado en una malla No. 200 (apertura de 0,075 mm) para el análisis de metales pesados.

### *Análisis de metales pesados*

Todos los análisis fueron realizados en el Laboratorio de Toxicología y Gestión Ambiental adscrito al departamento de Química de la Facultad de Ciencias Básicas de la Universidad de Córdoba. Las mediciones de As, Cd, Zn, Pb, Cu y Mn se realizaron en un equipo de absorción atómica marca Thermo Scientific Serie ICE3500. En el caso del Hg, para las muestras líquidas se empleó un Lumex RA 915M y para muestras sólidas un analizador directo de mercurio DMA-80 Tricell de Milestone.

### *Agua*

Las digestiones de los metales As, Cd, Zn, Pb, Cu y Mn se realizaron en un horno microondas (Ethos Touch serie 127697 de Milestone), siguiendo el método EPA 3015A con modificaciones (EPA, 2007a), fueron agregados 45mL de muestra y 5mL de HNO<sub>3</sub> concentrado a un vaso de teflón previamente limpio y seco, posteriormente el calentamiento se realizó mediante un programa de temperatura de 20 minutos de duración. Para los metales Cd y Pb se empleó la técnica de atomización por horno de grafito EPA 200.9 (USEPA, 1994b); por su parte, para el Zn, Cu y Mn se empleó la técnica atomización en llama SM 3111B (APHA-AWWA-WEF, 2017a), mientras que para el As (se cuantificó el total) se utilizó la generación de hidruros a partir de NaBH<sub>4</sub> con atomización por llama SM 3114B (APHA-AWWA-WEF, 2017b).

La determinación de Hg (se cuantificó el total) se realizó en un equipo Lumex RA 915M con el dispositivo RP-92 empleando la técnica de vapor frío con atomización por llama y determinación por espectrometría de absorción atómica con corrección de efecto Zeeman (Sholupov et al., 2004). Para la digestión y el montaje de aireación para la generación de vapor de mercurio se siguió el método EPA 7470A (USEPA, 1994b), una mezcla de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> y HNO<sub>3</sub> se adicionó a la muestra de agua, seguido de solución de KMnO<sub>4</sub>, la mezcla se digestó en un baño de calentamiento a 95°C durante 2 horas, después se enfrió y se agregó hidroxilamina para eliminar el exceso de KMnO<sub>4</sub>; el vapor de mercurio se obtuvo tras la adición de SnCl<sub>2</sub> y aireación en un sistema cerrado.

### *Material particulado*

La determinación de Hg total en el material particulado (sólidos suspendidos totales) se realizó por espectroscopia de absorción atómica con la técnica de descomposición térmica y amalgamación siguiendo el método EPA 7473 (USEPA, 2007b).

Para la determinación de los metales As, Cd, Zn, Pb, Cu, Mn y Fe en material particulado (sólidos suspendidos totales) se realizó una digestión microondas (Ethos Touch serie 127697 de Milestone) con HNO<sub>3</sub> y H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> siguiendo las recomendaciones del método EPA 3051B (USEPA, 1994c). Para los metales Cd y Pb se empleó la técnica de atomización por horno de grafito, por su parte para el Zn, Cu, Mn, Fe y As se empleó la técnica atomización en llama, para este último metal, el digestado se sometió a una reacción de generación de hidruros con NaBH<sub>4</sub>.

### *Control de calidad analítico*

Con el fin de proporcionar un alto grado de confianza y veracidad de los métodos analíticos que se emplearon, se evaluaron blancos, estándares, duplicados, muestras dopadas y materiales de referencia certificados (mercurio en agua –SRM 1641d, metales en agua –SRM 1640a y metales traza en sedimentos –IAEA-SL-1).

### *Análisis estadístico y tratamiento de resultados*

Los resultados obtenidos se presentan como la media  $\pm$  la desviación estándar. Tras verificar los supuestos de normalidad (prueba de Shapiro Wilk) y homocedasticidad (prueba de Levene) y luego de aplicar transformaciones de raíz y potencia, las variables que no se ajustaron a una distribución normal, se analizaron mediante pruebas no paramétricas. La variación temporal de cada metal en la matriz agua y en el material particulado, se evaluó mediante la prueba U de Mann Whitney. Por su parte, las diferencias entre estaciones (variación espacial), fueron evaluadas mediante la prueba de comparaciones múltiples de Kruskal-Wallis. Todos los análisis estadísticos se realizarán a un nivel de significancia del 95% empleando el paquete estadístico Statistica 10 de Statsoft Inc. para Windows.

## **Resultados y discusión**

### *Concentración de metales pesados en agua*

En el agua del río Cauca la concentración decreciente de metales de acuerdo al siguiente orden Mn>Hg>Pb>As>Cd (tabla 1), los metales Cu y Zn estuvieron por debajo del límite de detección (100,00 y 50,00  $\mu\text{g/L}$ , respectivamente) en todos los sitios de muestreo durante todo el estudio. La concentración más alta encontrada entre los metales estudiados se presentó para el Mn con 7.068  $\mu\text{g/L}$ , por otro lado, el Cd se encontró a niveles bajos (0,17 – 0,58  $\mu\text{g/L}$ ) únicamente en 3 sitios de muestreo.

El rango de concentración encontrado en el presente estudio para el Hg, supera el límite máximo permisible para aguas de consumo de 6,00  $\mu\text{g/L}$  establecido por la organización mundial de la salud (WHO) en todos los sitios de muestreo. La concentración media de Mn hallada en el tramo de río Cauca también supera el umbral de la WHO de la tabla 1. Para el Pb, la concentración máxima hallada en el tramo de río Cauca supera el umbral de 10,00  $\mu\text{g/L}$  establecido por la WHO, sin embargo, la concentración media de 5,80  $\mu\text{g/L}$  es inferior. Los metales Cd, As y Zn se encuentran por debajo de los límites permisibles de la WHO para aguas de consumo. Finalmente,



debido a que el límite de detección del método empleado para el Cu en este estudio se encuentra por encima del umbral de referencia, no se pueden realizar inferencias respecto de este metal.

En Colombia no existen reportes de múltiples elementos en aguas de ríos, sin embargo, recientemente Gutiérrez-Mosquera et al., (2021) reportaron concentraciones de Hg en lagunas formadas alrededor del río San Juan, como resultado de las actividades de minería de oro de 2 a 20 años, el rango de concentraciones de <0,01-0,05 µg/L, fue inferior al hallado en el presente estudio. El único reporte de múltiples elementos en aguas se realizó en ciénegas del departamento de Córdoba, Romero et al., (2011) encontraron concentraciones de Zn entre 30 y 50 µg/L, mientras que la concentración de Hg, Cu, Pb y Cd fue inferior a 0,50, 50,00, 4,00 y 2,00 µg/L, respectivamente, lo anterior indica claramente que el agua del río Cauca en el tramo estudiado presenta niveles de metales pesados mucho mas altos que los reportados en el agua de otros ecosistemas acuáticos en Colombia.

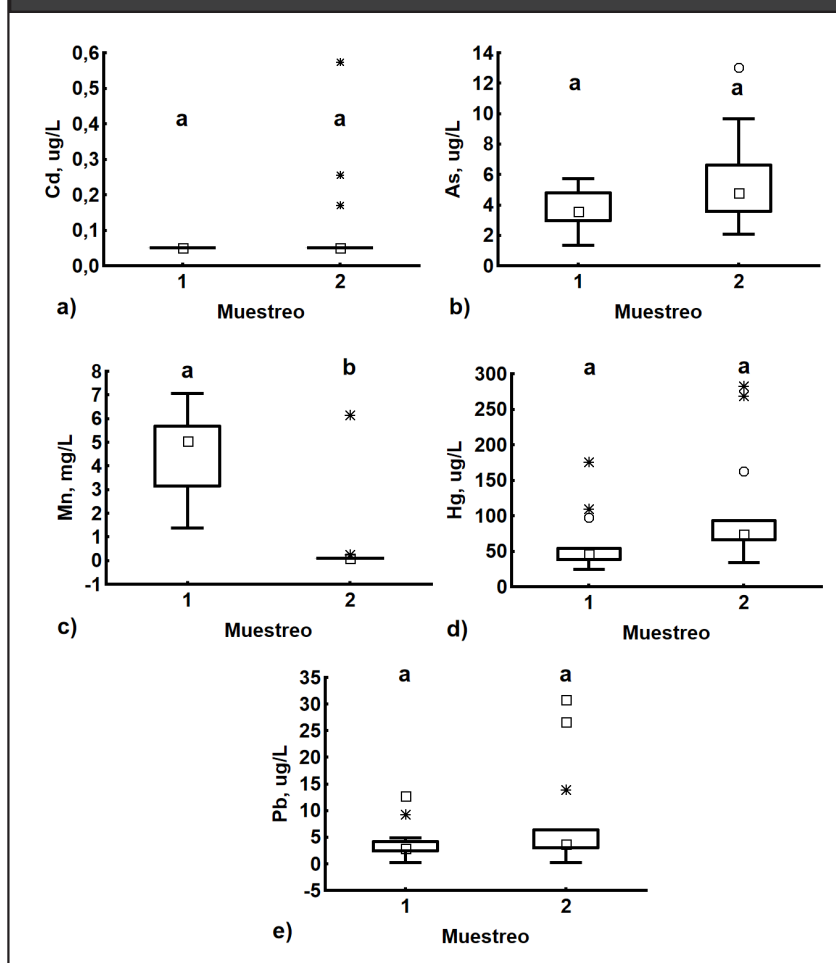
**Tabla 1.** Concentración media general (µg/L), desviación estándar y concentración mínima y máxima de Pb, Cd, As, Cu, Zn, Mn, y Hg en agua del río Cauca. LD: Límite de detección. LP: Límite permisible de acuerdo con la organización mundial de la salud (WHO, 2017).

Metal	Media	Desviación Estándar	Mínimo	Máximo	LD	LP según WHO
Pb	5,80	7,61	<LD	20,02	0,50	10,00
Cd	0,08	0,12	<LD	0,58	0,10	3,00
As	4,72	2,50	2,00	8,01	1,00	10,00
Cu	<LD	-	<LD	-	100,00	30,00
Zn	<LD	-	<LD	-	50,00	500,00
Mn	2.530,00	930,00	<LD	7.068,00	200,00	400,00
Hg	83,20	67,99	32,57	183,15	0,01	6,00

### *Distribución temporal de metales pesados en el agua*

La concentración media de los metales pesados en agua durante las dos campañas de muestreo se presenta en la figura 2. Para todos metales estudiados, se encontró que la concentración fue ligeramente superior en la segunda campaña de muestreo, con excepción del Mn; se observó mayor variabilidad de las concentraciones en la segunda campaña muestreo. Únicamente para las concentraciones de Mn se encontró una variación temporal significativa ( $p < 0,01$ ), en tanto que, para los demás metales, Hg, Pb, As y Cd, no se observaron diferencias significativas ( $p > 0,05$ ). En el caso del Cu y Zn, no se realizó la prueba debido a que estos metales no fueron detectados en ningún sitio de muestreo. Esta ausencia de diferencias entre las concentraciones para las dos épocas de muestreo pueden atribuirse a la corta distancia entre muestreos (alrededor de dos meses), otros autores como Ekpo et al., (1999) observaron diferencias estacionales en la concentración de metales como Zn, Fe, Cu y Cd, sin embargo, la diferencia entre un muestreo y otro en este estudio fue de seis meses.

**Figura 2.** Concentración media de a) Cd b) As, c) Mn, d) Hg y e) Pb en el agua del río Cauca para los 13 sitios de muestreo durante dos campañas de muestreo. Letras distintitas indican diferencias significativas para un nivel  $\alpha = 0,05$



### *Distribución espacial de metales pesados en el agua*

En la tabla 2 los metales Cu y Zn no se muestran debido a que no fueron detectados en el agua de ningún sitio de muestreo. Otro metal con una frecuencia de aparición baja en el agua del río Cauca fue el Cd, encontrado sólo en los sitios P08, P09 y P10, durante la segunda campaña de muestreo. Por su parte, la concentración de Mn en el agua como ya se discutió en la sección anterior, mostró una variación estacional denotada principalmente por su presencia en todos los sitios del muestreo realizado en enero, no obstante, para el segundo muestreo de marzo únicamente se encontró en 2 de los 13 sitios de muestreo. Mientras que el As y Hg fueron detectados en todas las muestras de agua analizadas, esto mismo sucedió para el Pb en los sitios P01 a P10 (tabla 2).

La concentración más alta de Pb en agua se encontró en los sitios asociadas con el río Nechí (P09 con 20,01  $\mu\text{g/L}$  y P08 con 19,66  $\mu\text{g/L}$ ), estadísticamente mayores ( $p < 0,05$ ) que el resto de los sitios monitoreados, con excepción de P10 otros sitios asociados al río Nechí cuya concentración media fue de 8,55  $\mu\text{g/L}$ .



Con respecto a la concentración de As en agua, los niveles más altos se obtuvieron para los sitios P09 y P08 (8,00 y 7,69 µg/L, respectivamente), si bien, sólo fueron estadísticamente diferentes ( $p < 0,05$ ) de los sitios con concentración baja, P04 y P13.

Las variaciones espaciales de las concentraciones de Hg en agua tuvieron un comportamiento parecido al descrito para las concentraciones de Pb y As en agua, puesto que los sitios P08 y P09 mostraron las concentraciones más elevadas (183,14 y 166,93 µg/L, respectivamente), a diferencia de los dos metales mencionados, también se observó una concentración relativamente alta en P03 (128,57 µg/L).

Finalmente, la variación espacial de la concentración de Mn en agua tuvo un comportamiento diferente al de los otros metales descritos, puesto que la concentración más alta se reporta en el sitio P13 en el municipio de Cauca (4.122,5 µg/L), sin diferencias estadísticas ( $p > 0,05$ ) entre los diferentes sitios de muestreo.

**Tabla 2.** Concentración media (µg/L) y desviación estándar de Pb, Cd, As, Mn y Hg en el agua del río Cauca (trayecto Cauca-Achí).

Sitio de muestreo	Pb	Cd	As	Hg	Mn
P01	4,50 ± 2,58	<LD	5,41 ± 2,58	73,50 ± 28,18	2.646,0 ± 3.600,6
P02	4,34 ± 0,88	<LD	5,26 ± 1,94	63,57 ± 14,14	2.889,5 ± 3.945,0
P03	4,27 ± 0,78	<LD	5,72 ± 0,00	128,57 ± 66,87	3.087,5 ± 4.225,0
P04	4,44 ± 0,46	<LD	2,52 ± 0,65	56,36 ± 14,85	738,5 ± 903,0
P05	2,78 ± 0,55	<LD	4,96 ± 0,22	52,36 ± 19,29	2.765,0 ± 3.768,9
P06	2,96 ± 0,12	<LD	4,35 ± 0,65	64,29 ± 31,72	2.575,0 ± 3.500,2
P07	2,96 ± 0,55	<LD	3,74 ± 0,22	90,29 ± 27,07	2.577,5 ± 3.503,7
P08	19,66 ± 9,82	0,15 ± 0,15	7,69 ± 2,80	183,14 ± 120,81	3.658,5 ± 4.820,3
P09	20,01 ± 15,25	0,31 ± 0,37	8,00 ± 7,10	166,93 ± 164,15	2.922,5 ± 3.991,6
P10	8,55 ± 7,58	0,11 ± 0,09	4,96 ± 2,40	94,71 ± 95,56	1.987,5 ± 2.669,3
P11	<LD	<LD	3,44 ± 1,50	32,57 ± 11,31	1.619,5 ± 2.148,9
P12	0,49 ± 0,34	<LD	3,28 ± 0,00	39,93 ± 4,95	1.313,5 ± 1.716,1
P13	<LD	<LD	2,00 ± 0,95	35,43 ± 1,82	4.122,5 ± 2.870,1

### *Concentración de metales pesados en material particulado*

El Mn fue el metal que mostró la concentración más elevada en los sólidos suspendidos con una media de 757,44 ± 312,74 mg/kg; las concentraciones de metales en los sólidos suspendidos mostraron el siguiente orden decreciente Mn>Zn>Cu>Pb>As>Hg>Cd (tabla 3). La concentración media de los metales As y Cu,

es mayor que la reportada por Viers et al., (2009) en la revisión bibliográfica más importante que se ha realizada sobre las concentraciones de metales en sedimentos suspendidos de diferentes ríos del mundo (61,1 mg/kg para Pb y 75,9 mg/kg para Cu).

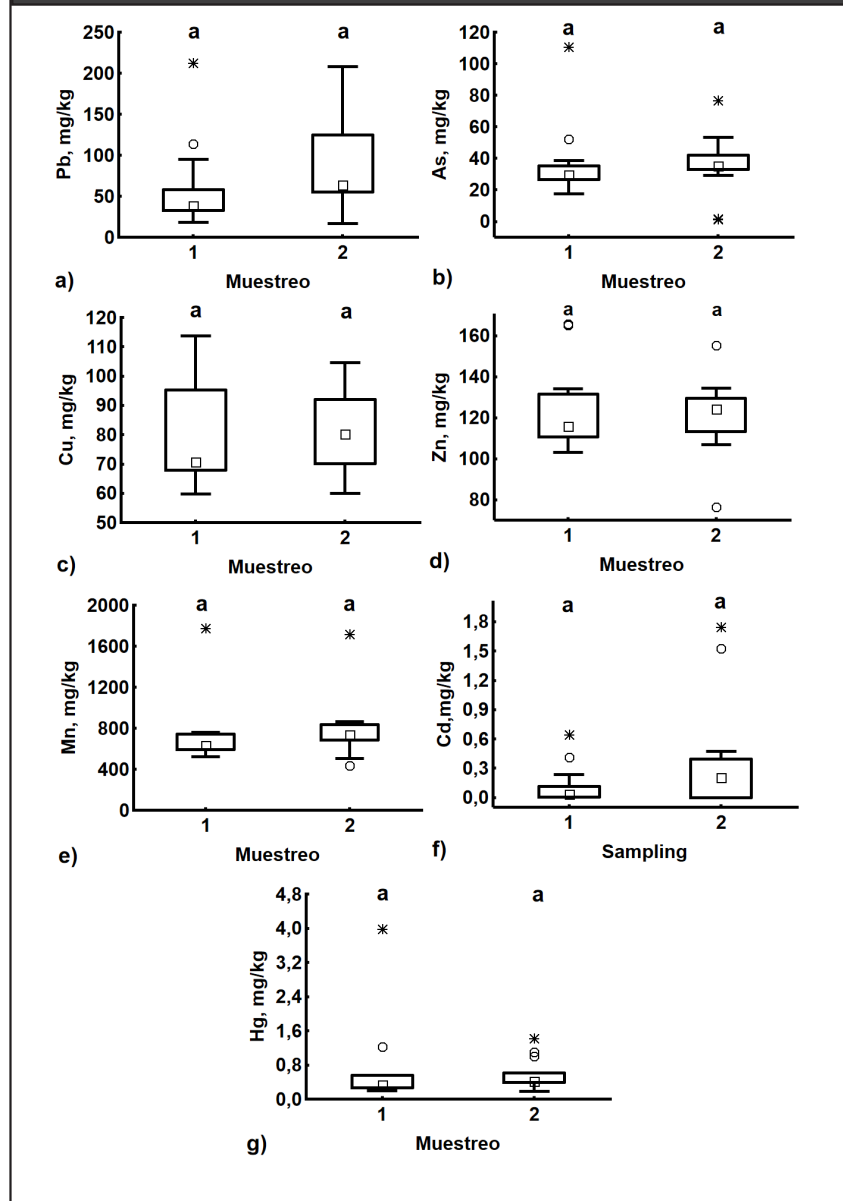
**Tabla 3.** Concentración media general (mg/kg), desviación estándar y concentración mínima y máxima de Pb, Cd, As, Cu, Zn, Mn, y Hg en material particulado del agua del río Cauca.

Metal	Media	Desviación Estándar	Mínimo	Máximo	LD
Pb	71,32	49,76	17,48	173,71	0,50
Cd	0,26	0,46	<LD	1,20	0,05
As	36,40	19,49	13,50	93,71	0,50
Cu	81,44	24,47	63,86	103,47	50,00
Zn	122,46	13,88	105,34	149,52	5,00
Mn	757,44	312,74	433,63	1.775,98	50,00
Hg	0,63	0,65	0,20	2,70	0,001

### *Distribución temporal de metales pesados en material particulado*

La variación temporal de la concentración de metales en sólidos suspendidos no evidenció un cambio significativo ( $p > 0,05$ ) para ninguno de los metales estudiados, incluido el Mn (para el cual si se observaron diferencias en el agua) y los metales no detectados en el agua, Cu y Zn. La poca variabilidad observada para sólidos suspendidos podría ser explicada por el corto espacio de tiempo entre los muestreos (alrededor de dos meses, entre 04 de enero y el 09 de marzo de 2019), debido a su carácter bimodal se esperaba que los caudales del río empezaran a incrementar en el mes de marzo cuando inicia la segunda época de caudales altos de la región del Bajo Cauca (CVC, 2017), asimismo, los caudales del río Cauca, estuvieron afectados por el desarrollo del proyecto Hidroituango lo cual pudo conducir a caudales inferiores a los esperados

**Figura 3.** Concentración media de a) Pb b) As, c) Cu, d) Zn, e) Mn, f) Cd y g) Hg en sólidos suspendidos de 13 sitios de muestreo del río Cauca durante dos campañas de muestreo. Letras distintitas indican diferencias significativas para un nivel  $\alpha = 0,05$



### *Distribución espacial de metales pesados en material particulado del río Cauca*

Las concentraciones medias de los diferentes metales pesados en los sólidos suspendidos se muestran en la tabla 4. El Cd presentó una tendencia diferente del resto de los metales puesto que no fue encontrado en 5 de los 13 sitios estudiados (P02, P04, P11, P12 y P13), por su parte el resto de los metales se encontraron en el material particulado de todos los sitios de muestreo en ambas campañas de muestreo.

La concentración de Pb en los sólidos suspendidos muestreados en los dos afluentes del río Cauca (173,71 mg/kg en el río Caribona – P04 y 160,89 mg/kg en el río Nechí – P09) fueron significativamente más altas ( $p < 0,05$ ) respecto de los demás puntos de muestreo.

En el río Caribona también se presentó la concentración más alta para el As (93,70 mg/kg), con diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) respecto de los demás sitios de muestreo, excepto para P13 donde se encontraron valores de 44.37 mg/kg, el sitio de muestreo con la segunda concentración más elevada.

Con relación a la concentración de Hg en sólidos suspendidos, se registró la mayor concentración en el río Caribona (2,69 mg/kg), la cual es hasta 3 veces mayor que la concentración encontrada en otros sitios como P03, P09 y P10 (rango entre 0,67 y 0,81 mg/kg), adicionalmente se encontraron diferencias significativas entre este sitio con relación a los otros sitios de muestreo estudiados.

Para el Cu, la concentración más alta hallada en los sólidos suspendidos fue en P13 (103,46 mg/kg), seguido de P04 (102,83 mg/kg), estos valores son ligeramente superiores a los encontrados en los otros sitios de muestreo (rango entre 68,35 y 96,95 mg/kg).

Al observar el comportamiento de las concentraciones de Zn en los sólidos suspendidos, se observan concentraciones parecidas entre los diferentes sitios de muestreo (entre 100 y 150 mg/kg), con la mayor concentración en el río Caribona (P04, 149,51 mg/kg), se puede inferir que para el tramo estudiado del río Cauca, la concentración de Zn en los sólidos sedimentables presenta un comportamiento homogéneo.

Para el caso del Mn, la concentración encontrada en P10 (1.746,88 mg/kg) fue la más alta del presente estudio para cualquier metal y cualquier matriz evaluada, se encontraron diferencias significativas entre P10 y el resto de los sitios estudiados ( $p < 0,05$ ), la concentración más baja se observó en P06 con 478,71 mg/kg.

**Tabla 4.** Concentración media (mg/kg) y desviación estándar de Pb, Cd, As, Cu, Mn, Zn y Hg en sólidos suspendidos del río Cauca (trayecto Caucasia-Achí).

Sitio de muestreo	Pb	Cd	As	Hg	Cu	Zn	Mn
P01	51,13 ±	0,21 ±	43,47 ±	0,37 ±	90,22 ±	146,99 ±	790,32 ±
	17,96	0,26	12,26	0,06	15,83	25,61	65,64
P02	48,83 ±		31,27 ±	0,39 ±	68,45 ±	107,99 ±	737,99 ±
	8,68	<LD	2,44	0,01	2,33	1,61	4,01
P03	46,38 ±	0,18 ±	31,54 ±	0,81 ±	75,31 ±	114,49 ±	814,50 ±
	17,82	0,09	4,27	0,58	1,19	4,57	73,78
P04	173,71 ±		93,70 ±	2,69 ±	102,83 ±	149,51 ±	579,56 ±
	54,67	<LD	23,79	1,81	15,28	22,73	74,12
P05	55,10 ±	0,16 ±	29,71 ±	0,33 ±	75,10 ±	117,35 ±	536,36 ±
	23,82	0,19	17,20	0,10	7,31	9,57	42,42
P06	50,72 ±	0,13 ±	35,58 ±	0,34 ±	77,99 ±	123,77 ±	478,71 ±
	12,44	0,15	5,28	0,12	10,16	2,65	63,76
P07	63,49 ±	0,12 ±	35,85 ±	0,39 ±	82,15 ±	129,1 ±	721,47 ±
	48,11	0,13	18,57	0,17	31,74	36,88	187,46
P08	109,74 ±	1,19 ±	31,57 ±	0,58 ±	63,86 ±	116,46 ±	713,18 ±
	21,21	0,78	3,14	0,04	5,63	4,53	161,09
P09	160,89 ±	0,97 ±	37,07 ±	0,72 ±	66,50 ±	132,9 ±	730,17 ±
	66,85	0,79	2,39	0,54	1,54	2,05	74,56
P10	95,85 ±	0,26 ±	31,40 ±	0,67 ±	69,54 ±	122,63 ±	1.746,88 ±
	53,44	0,30	5,54	0,47	0,58	9,60	41,14
P11	29,21 ±		13,50 ±	0,22 ±	96,95 ±	111,18 ±	691,09 ±
	11,66	<LD	16,69	0,04	2,35	1,86	47,70
P12	17,48 ±		14,17 ±	0,20 ±	86,39 ±	114,27 ±	650,94 ±
	0,91	<LD	17,44	0,03	4,32	0,58	43,70
P13	24,69 ±		44,37 ±	0,40 ±	103,46 ±	105,34 ±	655,55 ±
	11,34	<LD	12,91	0,24	2,01	40,74	86,57

## Conclusiones

Es importante resaltar que los metales potencialmente riesgosos los cuales superaron los niveles máximos permitidos fueron el Hg, Pb, y Mn, lo cual supone un riesgo para la salud de la población humana y del medio ambiente, por lo cual se hace fundamental seguir realizando muestreos para encontrar concentraciones en el agua del río, así mismo estas muestras deben ser tomadas también a la flora y fauna local así como a la población humana en contacto directo con el río y las especies que tienen contacto con este.

Los altos niveles de Hg, Pb, y Mn presentes en el agua del tramo estudiado se deben a la acción antropogénica ya que en el área de estudio se practica actividad minera intensiva ya que se encuentra en dos grandes distritos mineros como son el del bajo Cauca y el de San Martín de Loba los cuales se encuentran en la cuenca que abastece al río Cauca.

## Referencias

- Corporacion Autonoma Regional del Sur de Bolivar - CSB. (2007). PLAN DE ORDENAMIENTO Y MANEJO DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA RIO CARIBONA EN JURISDICCIÓN DE LA CORPORACIÓN AUTONOMA REGIONAL DEL SUR DE BOLIVAR "CSB" Corporación Social para el Desarrollo Integral de la. 1–213.
- Correa, A. R. 2017. Desarrollo socio-económico regional: Impactos de la minería artesanal en el Bajo Cauca antioqueño. *Revista Internacional de Cooperación y Desarrollo*. 4(1): 46-61. DOI: 10.21500/23825014.3116.
- Custodio, M., Peñaloza, R., Espinoza, C., Peralta-Ortiz, T., Ordinola-Zapata, A., Sánchez-Suárez, H., & Vieyra-Peña, E. (2020). Data on the concentration of heavy metals and metalloids in lotic water of the Mantaro river watershed and human risk assessment, Peru. *Data in Brief*, 30. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2020.105493>
- Diaz Arriaga, F. A. (2014). Mercurio en la minería del oro: impacto en las fuentes hídricas destinadas para consumo humano. *Revista De Salud Pública*, 16(6), 947-957. <https://doi.org/10.15446/rsap.v16n6.45406>
- Güiza Suárez, L. (2014). LA MINERÍA MANUAL EN COLOMBIA: UNA COMPARACIÓN CON AMÉRICA LATINA. *Boletín De Ciencias De La Tierra*, (35), 37-44. <https://doi.org/10.15446/rbct.n35.37056>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales -IDEAM. 2019. Estudio Nacional del Agua 2018. Bogotá: IDEAM.
- Londoño Franco, L. F., Londoño Muñoz, P. T., & Muñoz Garcia, F. G. (2016). Los Riesgos De Los Metales Pesados En La Salud Humana Y Animal. *Biotecnología En El Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 14(2), 145. [https://doi.org/10.18684/bsaa\(14\)145-153](https://doi.org/10.18684/bsaa(14)145-153)
- Mancilla-Villa, Ó. R., Ortega-Escobar, H. M., Ramírez-Ayala, C., Uscanga-Mortera, E., Ramos-Bello, R., & Reyes-Ortigoza, A. L. (2011). Metales pesados totales y arsénico en el agua para riego de puebla y Veracruz, México. *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, 28(1), 39–48.
- Marrugo-Negrete, J., Benitez, L. N., & Olivero-Verbel, J. (2008). Distribution of mercury in several environmental compartments in an aquatic ecosystem impacted by gold mining in northern Colombia. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 55(2), 305–316. <https://doi.org/10.1007/s00244-007-9129-7>
- Matsuyama, A., Yano, S., Taninaka, T., Kindaichi, M., Sonoda, I., Tada, A., & Akagi, H. (2018). Chemical characteristics of dissolved mercury in the pore water of Minamata Bay sediments. *Marine Pollution Bulletin*, 129(2), 503–511. Doi: 10.1016/j.marpolbul.2017.10.021.
- Moreno-Huaranga, F., García-Méndez, E., León-Quilcat, V., & Arévalo-Huaranga, F. (2012). Contaminación por metales pesados en la Cuenca del Río Moche, 1980 – 2010, La Libertad – Perú. *Scientia Agropecuaria*, 3(3), 235–247. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=357633703005>
- Núñez, S. E. R., Negrete, J. L. M., Rios, J. E. A., Hadad, H. R., & Maine, M. A. (2011). Hg, Cu, Pb, Cd, and Zn accumulation in macrophytes growing in tropical wetlands. *Water, Air, and Soil Pollution*, 216(1–4), 361–373. <https://doi.org/10.1007/s11270-010-0538-2>
- PNUD. 2016. Objetivos de Desarrollo Sostenible, Colombia Herramientas de aproximación al contexto local. Disponible en: <https://www.undp.org/content/dam/colombia/docs/ODM/undp-co-ODSColombiaVSWWS-2016.pdf>.
- Raimann, X., Lorena Rodríguez, O., Chávez, P., & Torrejón, C. (2014). Mercury in fish and its importance in health. *Revista Medica de Chile*, 142(9), 1174–1180. <https://doi.org/10.4067/s0034-98872014000900012>
- RAMIREZ y AYALA, R., & AZCONA-CRUZ, M. I. (2017). Efectos tóxicos del manganeso. *Rev Esp Méd Quir*, 22, 71–76. <https://www.medigraphic.com/pdfs/quirurgicas/rmq-2017/rmq172d.pdf>
- Romero, C. ; Nicodemus, N. ; Rodríguez, J. D. ; García, A. I.; de Blas, C., 2011. Effect of type of grinding of barley and dehydrated alfalfa on performance, digestion, and crude mucin ileal concentration in growing rabbits.. *J. Anim. Sci.*, 89 (8): 2472-2484

- Secretaria de medio ambiente, recursos naturales y pesca. (2000). NOM-001-ECOL-1996. Que establece los límites máximos permisos de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Diario Oficial de La Federación, 5–29.
- Tomno, R. M., Nzeve, J. K., Mailu, S. N., Shitanda, D., & Waswa, F. (2020). Heavy metal contamination of water, soil and vegetables in urban streams in Machakos municipality, Kenya. *Scientific African*, 9. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2020.e00539>
- U.S. EPA (U.S. Environmental Protection Agency), 1988. Integrated Risk Information System (IRIS). Manganese (CASRN 7439-96-5).
- U.S. EPA 1989. Risk assessment guidance for Superfund. Volume I: Human health evaluation manual (Part A). Interim Final. Office of Emergency and Remedial Response. EPA/540/1-89/002. 289 pp. Disponible en <https://semspub.epa.gov/work/HQ/191.pdf>.
- U.S. EPA, 2019. U. S. Environmental Protection Agency. Regional Screening Levels for Chemical Contaminants at Superfund Sites. Disponible en <https://semspub.epa.gov/src/document/HQ/199626>.
- U.S. EPA. 1994a. Method 200.9, Revision 2.2: Determination of Trace Elements by Stabilized Temperature Graphic Furnace Atomic Absorption
- U.S. EPA. 1994b. Method 7470A (SW-846): Mercury in Liquid Waste (Manual Cold-Vapor Technique), Revision 1. Washington, DC.
- U.S. EPA. 1998. "Method 7473 (SW-846): Mercury in Solids and Solutions by Thermal Decomposition, Amalgamation, and Atomic Absorption Spectrophotometry," Revision 0. Washington, DC.
- U.S. EPA. 2007a. "Method 3015A (SW-846): Microwave Assisted Acid Digestion of Aqueous Samples and Extracts," Revision 1. Washington, DC.
- UNODC. 2018. Explotación de oro de aluvión. Evidencias a partir de percepción remota 2016. Disponible en: [https://www.unodc.org/documents/colombia/2016/junio/Explotacion\\_de\\_Oro\\_de\\_Aluvion.pdf](https://www.unodc.org/documents/colombia/2016/junio/Explotacion_de_Oro_de_Aluvion.pdf).
- UNODC. 2018. Explotación de oro de aluvión. Evidencias a partir de percepción remota 2016. Disponible en: [https://www.unodc.org/documents/colombia/2016/junio/Explotacion\\_de\\_Oro\\_de\\_Aluvion.pdf](https://www.unodc.org/documents/colombia/2016/junio/Explotacion_de_Oro_de_Aluvion.pdf).
- UN-WATER, 2016. Towards a Worldwide Assessment of Freshwater Quality. A UN-Water Analytical Brief. UN-Water, Genève, Switzerland. 36pp.
- UPME-MME-UNICOR. 2015. Unidad de Planeación Minero Energética, Ministerio de Minas y Energía, Universidad de Córdoba. Estudio de la cadena del mercurio en Colombia con énfasis en la actividad minera de oro. Informe Técnico (Reporte Final) (Bogotá D.C).
- Zakir, H. M., Sharmin, S., Akter, A., & Rahman, M. S. (2020). Assessment of health risk of heavy metals and water quality indices for irrigation and drinking suitability of waters: a case study of Jamalpur Sadar area, Bangladesh. *Environmental Advances*, 2(August), 100005. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2020.100005>