




<https://doi.org/10.15517/rev.biol.trop.v71i1.51493>

Fitorremediación con Brassicaceae y Apiaceae en suelos contaminados con metales pesados

Ángela Patricia Salamanca-Rivera^{1*};  <https://orcid.org/0000-0001-9045-4855>

Diego Alejandro Silva¹;  <https://orcid.org/0000-0002-8577-8959>

Juan Cardozo-Muñoz²;  <https://orcid.org/0000-0003-1339-6377>

Fabián Rojas-Sánchez¹;  <https://orcid.org/0000-0001-9418-1997>

Juan Camilo Meléndez-Mazabel¹;  <https://orcid.org/0000-0002-1456-7847>

Luis Santiago Borda-Chingate¹;  <https://orcid.org/0000-0002-8974-4545>

1. Ingeniería Agroecológica, Corporación Universitaria Minuto de Dios-UNIMINUTO, Calle 81B #72B-70, Bogotá, Colombia; asalamanca@uniminuto.edu (*Correspondencia), diego.silva@uniminuto.edu, fabian.rojas@uniminuto.edu, jmelendezma@uniminuto.edu.co, luis.borda.c@uniminuto.edu
2. Departamento de Química, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia-UNAL, Av. Carrera 30 #45-03 Edif. 476, Bogotá, Colombia; jcardozom@unal.edu.co

Recibido 26-VI-2022. Corregido 02-XI-2022. Aceptado 19-IV-2023.

ABSTRACT

Phytoremediation with Brassicaceae and Apiaceae in soils contaminated with heavy metals.

Introduction: The middle basin of the Bogotá River has been suffering from heavy metal contamination due to industrial discharges. This water source has been used to irrigate short-cycle crops, which has resulted in heavy metal contamination of productive soils.

Objective: To evaluate a phytoremediation process with the plant species Broccoli (*Brassica oleracea* var. *Italica plenck*) and Cilantro (*Coriandrum sativum* L.) in soils contaminated with heavy metals in Mosquera, Colombia.

Methods: Sampling was performed with a randomized factorial design: a) cilantro/broccoli proportions (30 cilantro/70 broccoli, 50/50, 70 cilantro/30 broccoli and two monoculture type controls of each species) and b) phytoremediation time (3, 6 and 9 months), each treatment with four experimental plots. Soil and plant tissue were analyzed in the laboratory by atomic absorption spectrophotometry to determine the concentration of heavy metals.

Results: The concentrations of heavy metals in plant tissue samples for broccoli and cilantro showed higher values of Cd, Pb and Cr than Hg and As, with respect to the control. The concentrations of Cd, Pb and Cr presented significantly higher values ($P < 0.05$) in soil where there was a mixed presence of cilantro and broccoli, with respect to the control site where the concentration of Cd registered significantly lower levels than in the other soils. Finally, Cd, Pb and Cr concentrations were higher in cilantro tissues and in soils with cilantro compared to the control.

Conclusions: Phytoremediation by means of *Brassica oleracea* var. *italica* Plenck and *Coriandrum sativum* L. in 70/30 or 30/70 proportions in soils with pH between 5.5 and 6.0 allows a good recovery of soils with heavy metal contents in terms of high concentrations in short terms, starting bioremediation after three months and ending loads of variable availability after nine months.

Key words: heavy metals; *Brassica oleracea* var. *Italica plenck*; *Coriandrum sativum* L.



RESUMEN

Introducción: La cuenca media del río Bogotá viene sufriendo contaminación por metales pesados debido a los vertidos industriales. Esta fuente de agua ha sido utilizada para el riego de cultivos de ciclo corto, lo que ha provocado la contaminación por metales pesados de los suelos productivos.

Objetivo: Evaluar un proceso de fitorremediación con las especies de Brócoli (*Brassica oleracea* var. *italica* Plenck) y Cilantro (*Coriandrum sativum* L.) en suelos contaminados con metales pesados en Mosquera, Colombia.

Métodos: El muestreo se realizó con un diseño factorial al azar: a) proporciones de cilantro/brócoli (30 cilantro/70 brócoli, 50/50, 70 cilantro/30 brócoli y dos controles de tipo monocultivo de cada especie) y b) tiempo de fitorremediación (3, 6 y 9 meses), cada tratamiento con cuatro parcelas experimentales. El suelo y el tejido vegetal se analizó mediante espectrofotometría de absorción atómica para determinar la concentración de los metales pesados.

Resultados: Las concentraciones de metales pesados en las muestras de tejido vegetal para brócoli y cilantro mostraron valores de Cd, Pb y Cr más altos que Hg y As, respecto al control. Las concentraciones de Cd, Pb y Cr presentaron valores significativamente más altos ($P < 0.05$) en suelos con cilantro y brócoli mezclados, respecto al sitio de control donde la concentración de Cd registró niveles significativamente más bajos que en los otros suelos. Las concentraciones de Cd, Pb y Cr fueron más altas en tejidos de cilantro y en suelos con cilantro en comparación con el control.

Conclusiones: La fitorremediación por medio de las especies *Brassica oleracea* var. *italica* Plenck y *Coriandrum sativum* L. en proporciones 70/30 o 30/70 a suelos con pH entre 5.5 y 6.0 permiten una buena recuperación de suelos con contenidos de metales pesados en términos de concentraciones altas a cortos plazos, iniciando la bio-remediación a los tres meses y finalizando cargas de disponibilidad variable a los nueve meses.

Palabras clave: metales pesados; *Brassica oleracea* var. *italica* Plenck; *Coriandrum sativum* L.

INTRODUCCIÓN

La cuenca media del río Bogotá comprendida entre los municipios de Chía y Sibaté presenta contaminación por metales pesados y microorganismos patógenos en sus aguas, debido a vertimiento de desechos provenientes de industrias de fundición de metales, petroquímica, curtiembres, insumos agrícolas y desechos humanos (Miranda et al., 2008). Esta fuente hídrica ha sido empleada para riego de cultivos de ciclo corto para consumo humano en la sabana de Bogotá (Ruíz, 2011). De los tres ríos que recogen los vertimientos de Bogotá, el río Tunjuelo es el que más aporta contaminación por metales pesados, situación relacionada con la presencia de actividades industriales en su área de influencia (Corporación Autónoma Regional, 2006). Las mediciones realizadas en tiempo seco han permitido identificar que los metales que han presentado los valores más elevados son cadmio, plomo y cromo. Otros metales identificados son: mercurio, níquel, bario, cobre, manganeso y zinc (Combariza,

2009; Corporación Autónoma Regional, 2006; Lizarazo et al., 2020).

Entre los años 2010 y 2011 el fenómeno de “La Niña” generó inundaciones con aguas del río Bogotá en el municipio de Mosquera por ruptura de un Jarillón, lo cual produjo contaminación con metales pesados en los suelos de carácter productivo, en donde se siembran hortalizas, legumbres, cereales y forraje de consumo humano y/o animal (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2011; Martínez, 2013). En lotes comerciales del municipio de Mosquera (Cundinamarca) se presentan altas concentraciones de plomo, cadmio, cromo, cobre, hierro, níquel y zinc, algunas de ellas por encima de los límites internacionales permitidos (Miranda et al., 2008). En este sentido la fitorremediación continúa siendo una de las mejores alternativas para la remediación de suelos contaminados con metales pesados (Fernández et al., 2017; Ghosh & Singh, 2005).

Los procesos de fitorremediación, también llamados fito-corrección y fito-limpieza son una propuesta tecnológica para la

descontaminación de suelos y cuerpos de agua, han sido empleados ex situ o in situ para reducir a niveles admisibles metales como cadmio, cromo, plomo, mercurio y selenio, entre otros (Cristaldi et al., 2017).

De acuerdo con Mani y Kumar (2014), y Kadiri et al. (2018) algunas hortalizas tienen la capacidad para la captación de metales pesados en su biomasa, esto se debe a su tolerancia y a su considerable producción de biomasa sobre el suelo. Las especies *Coriandrum sativum* y *Brassica oleracea* pertenecientes a las familias Apiacea y Brassicaceae respectivamente son hortalizas de ciclo corto que cuentan con mecanismos para la captación de metales, principalmente en los órganos florales y semillas. Estas especies vegetales son conocidas como acumuladoras de metales y han sido evaluadas como potenciales plantas fitoextractoras, gracias a que pueden acumular cantidades relativamente elevadas de metales tóxicos, sin presentar síntomas visibles (Mourato et al., 2015). De acuerdo con lo anterior el objetivo de la investigación fue evaluar un proceso de fitorremediación empleando especies vegetales como Brócoli y Cilantro en suelos contaminados con metales pesados.

MATERIALES Y MÉTODOS

Equipos: Los metales pesados se cuantificaron mediante el uso de un equipo de espectrofotometría de absorción atómica marca SHIMADZU, referencia AA 7000, con llama de aire con acetileno de alta pureza (99.8 %); se usaron soluciones estándar de cada uno de los metales 1.0 g/l PANRREAC para AAS y curva de calibración en ppm: 0.01mg/L, 0.05 mg/L, 0.10 mg/L, 0.20 mg/L, 0.40 mg/L respectivamente. Se adoptaron métodos de laboratorio estándar que garantizaron el control de calidad para la exactitud de los datos analíticos. La determinación de las concentraciones de los metales pesados en suelo se dio por medio del uso de lámparas de cátodo hueco para Plomo (Pb: mg/L, 217 nm, slit 0.7 nm, corriente 12 mA), Cadmio (Cd: mg/L, 228.8 nm, slit 0.7 nm, corriente 8 mA), Cromo (Cr: mg/L, 357.9 nm,

slit 0.7 nm, corriente 12 mA), Arsénico (As: mg/L, 193.7 nm, slit 0.7 nm, corriente 7 mA) y Mercurio (Hg: mg/L, 253.7 nm, slit 0.7 nm, corriente 3 mA) este último con generador de hidruros HVG-1 SHIMADZU de bomba peristáltica movida mediante Argón de alta pureza, técnica vapor frío (Fundación de Asesorías para el Sector Rural Ciudad de Dios, 2021).

Digestión de muestras y pH: El material vegetal de *B. oleracea* y *C. sativum* fue procesado por medio de mineralización por vía seca según GTC 189 (Análisis de tejido vegetal) y Norma Técnica Colombiana (NTC 5755) digestión y mineralización de muestras por el método de calcinación. Posteriormente se realizó el análisis de los elementos por Absorción Atómica, cuantificando metales pesados (Pb, Cd, Cr, Hg y As). El pH se midió con un potenciómetro en relación 1:1 suelo: agua, con medida electrométrica de acuerdo con la norma técnica colombiana NTC 5264 y la textura mediante el método del densímetro Bouyoucos siguiendo las indicaciones del American Standard Testing Materials ASTM D 422-63 (Fundación de Asesorías para el Sector Rural Ciudad de Dios, 2021).

Área de estudio: El presente estudio se realizó en suelos agrícolas de La Granja Experimental Mosquera, ubicada en la vereda de San José en el Municipio de Mosquera, Cundinamarca-Colombia, Sabana Occidental. La granja se encuentra ubicada en las coordenadas geográficas (4°39'29.85" N & 74°12'12.45" W), con temperatura promedio anual de 12.6 °C en temporada fresca y una precipitación anual entre 127 y 150 mm (Weatherspark, 2022), con altura sobre el nivel del mar de 2 544 m. Los suelos de la región estudiada corresponden al orden Andisol (Soil Survey Staff, 2014) y de textura Arcillo Arenoso (ArA) (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 1990).

Sistema de muestreo: El muestreo se realizó con un diseño completamente al azar, de tipo factorial. Se propusieron dos factores: a) proporciones de Cilantro/Brócoli en cada

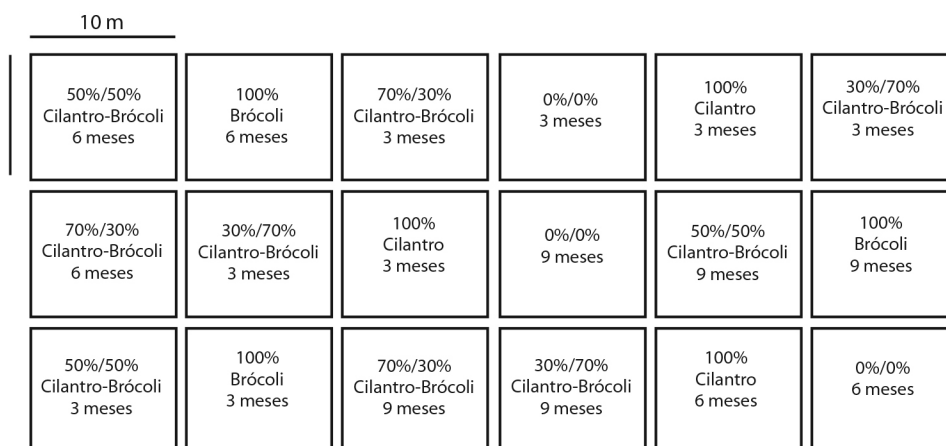


Fig. 1. Diseño experimental de muestro en parcelas. / **Fig. 1.** Experimental sample design in plots.

parcela y b) tiempo de fitorremediación. Se establecieron tres tiempos de fitorremediación: 3 meses, 6 meses y 9 meses, y tres porcentajes de las especies vegetales de interés: 30 cilantro/70 brócoli, 50/50 y 70 cilantro/30 brócoli y dos controles (monocultivo de cada especie), el tiempo cero se tomó como referencia interna del ensayo, permitiendo de esta manera establecer parámetros estadísticos de control. Para cada tratamiento se diseñaron cuatro parcelas experimentales (Fig. 1).

Durante el periodo del diseño experimental las especies vegetales, fueron regadas con el agua del acueducto de Bogotá. Las muestras de suelo fueron tomadas en cada una de las parcelas de acuerdo con la densidad de siembra (100 % cilantro, 100 % brócoli, 30 cilantro/70 brócoli, 50/50 y 70 cilantro/30 brócoli) a 20 cm del perfil, debido a que es la zona donde se concentran las raíces y se acumulan los metales pesados de fuentes antrópicas (Micó et al., 2006). De la misma forma se tomaron muestras del material vegetal de las especies fitorremediadoras, según las densidades de siembra estipuladas en el bioensayo. Luego se llevaron las muestras de suelo (250 g de cada una) y las muestras de tejido vegetal (partes aéreas) para la determinación y cuantificación de metales pesados en laboratorio (Fundación de Asesorías para el Sector Rural Ciudad de Dios, 2021).

Análisis estadístico: Para el análisis estadístico se utilizaron los programas con software libres: Rstudio y Python, aplicando criterios estadísticos como correlaciones matriciales, pruebas de medias normales en ANOVA y parámetros de medias junto a varianzas para el análisis de los datos en términos de dispersión.

RESULTADOS

Los resultados de concentraciones de metales pesados en las nueve muestras de tejido vegetal para Brócoli y Cilantro (Tabla 1), permiten observar valores de Cd, Pb y Cr significativamente más altos ($P < 0.05$) que Hg y As, respecto al sitio de control. Así mismo, la concentración de Cd es significativamente más alta en el tejido vegetal de Cilantro y Brócoli en las muestras de suelo analizadas. Respecto a las concentraciones de Cd, Pb y Cr vale la pena resaltar que estos valores fueron significativamente más altos ($P < 0.05$) en suelo donde se encontraba una presencia mixta de Cilantro y Brócoli, respecto al sitio de control donde la concentración de Cd registró niveles significativamente más bajos que en los otros suelos.

El panorama visual de la Tabla 1, ha sido representado en la Fig. 2, donde se puede observar los dos periodos de tiempo; 3 meses (1) y 9 meses (2) evaluados para cada uno de

Tabla 1

Resultados de concentraciones de metales pesados en ppm de las muestras en tejidos vegetales. / **Table 1.** Results of concentrations of heavy metals in ppm of the samples in plant tissues.

Material Vegetal	*Cd	Hg	*Pb	As	*Cr
Control 3M	3.660	0.002	12.900	0.002	5.620
100 % Brócoli	0.390	0.002	0.050	0.002	8.943
100 % Cilantro	2.827	0.002	0.040	0.002	4.807
50 % B	0.333	0.002	0.183	0.002	12.000
50 % C	4.937	0.002	0.180	0.002	9.390
70/30 C	6,647	0.002	0.050	0.002	9.040
70/30 B	0.470	0.002	0.050	0.002	6.240
30/70 C	6.580	0.002	0.580	0.002	11.130
30/70 B	1.023	0.002	0.050	0.002	2.680
Control 9M	3.660	0.002	12.900	0.002	5.620
100 % Brócoli	0.790	0.002	0.050	0.002	1.037
100 % Cilantro	10.970	0.002	0.050	0.002	4.063
50 % B	1.473	0.002	1.013	0.002	1.133
50 % C	10.780	0.002	0.050	0.002	0.580
70/30 C	9.823	0.002	0.050	0.002	2.510
70/30 B	1.073	0.002	0.050	0.002	1.913
30/70 C	12.200	0.002	0.383	0.002	2.240
30/70 B	1.060	0.002	0.050	0.002	0.217

*Valores obtenidos por dilución de las muestras problema. / *Values obtained by dilution of the test samples.

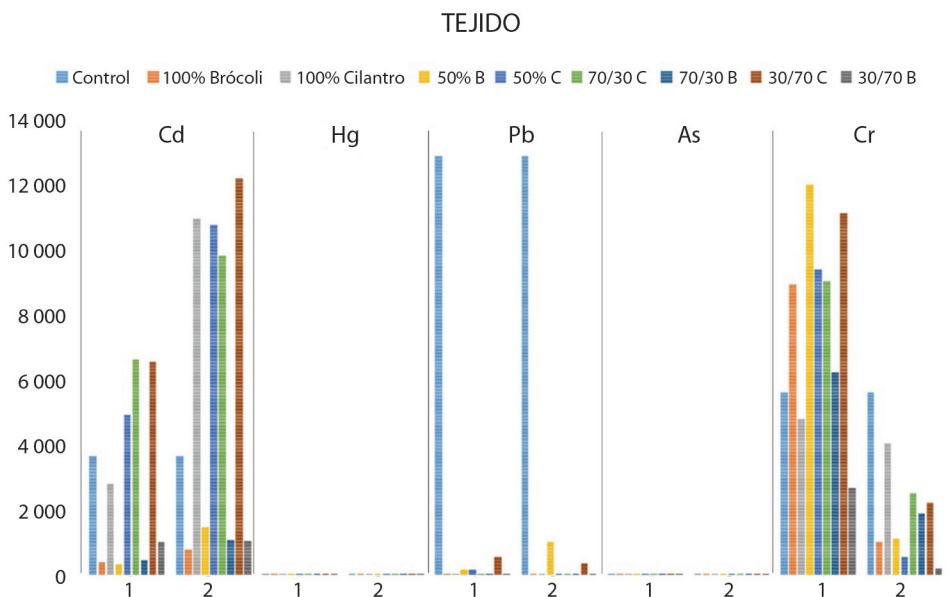


Fig. 2. Diagrama de barras para las concentraciones de metales pesados en tejido vegetal. *1: Tiempo de análisis 3 meses, 2: Tiempo de análisis 9 meses. / **Fig. 2.** Bar chart for heavy metal concentrations in plant tissue. *1: Analysis time 3 months, 2: Analysis time 9 months.

los metales. En este orden de ideas, es preciso resaltar un aumento en las concentraciones de cadmio para los periodos evaluados mientras que en el caso del cromo su comportamiento fue contrario a la tendencia ya mencionada. En el caso del plomo su concentración se mantuvo estable en el periodo de tiempo como disponibilidad en tejido vegetal, esto también observado en el mapa de calor Fig. 3 y la Tabla 2 de correlación entre los metales.

Frente a las concentraciones de Cd, Pb y Cr se resalta que fueron más altas en tejidos de Cilantro y en suelos con Cilantro en comparación con el control. Las concentraciones promedio de Cd en tejido vegetal y suelo siguen la tendencia: tejido > suelo. Lo anterior permite evidenciar que las concentraciones de metales pesados en tejidos de las especies vegetales respecto de las concentraciones en el suelo fueron significativas ($P < 0.05$). Además, se pudo establecer que no existe una relación significativa

para los metales Hg y As en tejidos y suelos de las muestras analizadas.

Los resultados de las concentraciones de metales pesados en las 18 muestras de suelo (Tabla 3), permiten observar valores elevados de Cd a los 9 meses respecto del control de los 3 meses de remediación para esta muestra, frente a los valores encontrados para Pb de la misma manera que Cd se nota un incremento de la concentración, llegando hasta valores de 12.933 ppm ($P < 0.05$) y finalmente el Cr presenta un comportamiento similar que el plomo, pero sin llegar a valores tan altos como los reportados.

Los periodos de tiempo evaluados en el presente estudio para el caso del análisis de metales en suelos, como ya fue mencionado corresponden a 3 meses (1), 6 meses (2) y 9 meses (3) (Fig. 4). La gráfica mencionada permite de manera introspectiva hacer un análisis del comportamiento de los metales en el suelo,

Tabla 2

Matriz de correlación de datos para las concentraciones de metales pesados en tejido vegetal. / **Table 2.** Data correlation matrix for heavy metal concentrations in plant tissue.

	Cd	Hg	Pb	As	Cr
Cd	1.000000	NaN	0.141780	NaN	-0.128099
Hg	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
Pb	0.141780	NaN	1.000000	NaN	0.266546
As	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
Cr	-0.128099	NaN	0.266546	NaN	1.000000

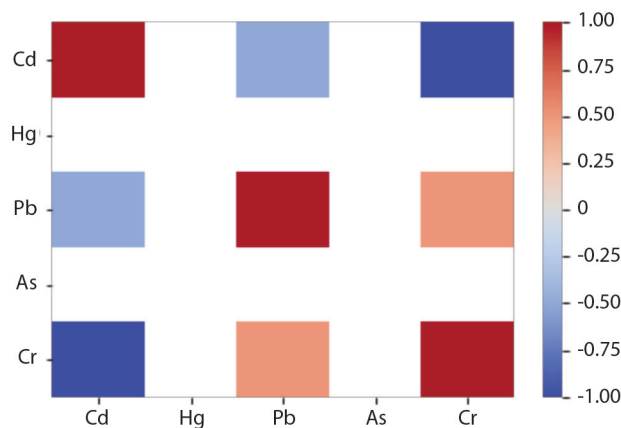


Fig. 3. Mapa de calor en términos de correlación de metales pesados en tejido vegetal. / **Fig. 3.** Heat map in terms of correlation of heavy metals in plant tissue.

Tabla 3

Resultados de concentraciones de metales pesados en ppm de las muestras de suelo. / **Table 3.** Results of concentrations of heavy metals in ppm of the soil samples.

Suelo	*Cd	Hg	*Pb	As	*Cr
Control 3M	1.020	0.002	2.670	0.002	0.050
100 % Cilantro	0.457	0.002	0.450	0.002	0.837
100 % Brócoli	3.900	0.002	0.140	0.002	0.750
50 % B-C	0.930	0.002	0.457	0.002	0.870
70/30 B-C	0.963	0.002	1.803	0.002	1.477
30/70 B-C	0.857	0.002	1.350	0.002	0.097
Control 6M	1.340	0.040	2.000	0.040	2.000
100 % Cilantro	1.223	0.040	2.000	0.040	2.000
100 % Brócoli	1.153	0.040	2.000	0.040	2.000
50 % B-C	1.333	0.040	2.000	0.040	2.000
70/30 B-C	1.150	0.040	2.000	0.040	2.000
30/70 B-C	1.157	0.040	2.000	0.040	2.000
Control 9M	3.660	0.002	12.900	0.002	5.620
100 % Cilantro	3.960	0.002	11.933	0.002	8.163
100 % Brócoli	3.943	0.002	12.200	0.002	6.103
50 % B-C	3.663	0.002	13.667	0.002	5.890
70/30 B-C	4.090	0.002	11.633	0.002	7.267
30/70 B-C	3.670	0.002	12.933	0.002	9.520

*Valores obtenidos por dilución de las muestras problema. / *Values obtained by dilution of the test samples.

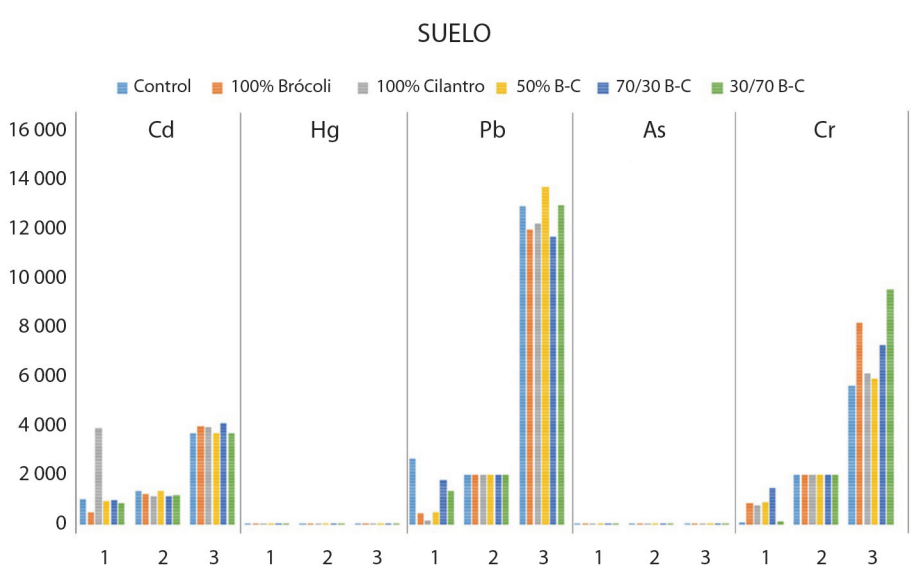


Fig. 4. Diagrama de barras para las concentraciones de metales pesados en muestras de suelo. *1: Tiempo de análisis 3 meses, 2: Tiempo de análisis 6 meses, 3: Tiempo de análisis 9 meses. / **Fig. 4.** Bar chart for heavy metal concentrations in soil samples. *1: Analysis time 3 months, 2: Analysis time 6 months, 3: Analysis time 9 months.

Tabla 4

Matriz de correlación de datos para las concentraciones de metales pesados en muestras de suelo. / **Table 4.** Data correlation matrix for heavy metal concentrations in soil samples.

	Cd	Hg	Pb	As	Cr	pH
Cd	1.000000	0.000000	0.449892	0.000000	0.641201	0.077560
Hg	0.000000	1.000000	-0.138823	1.000000	0.000000	-0.068288
Pb	0.449892	-0.138823	1.000000	-0.138823	0.798715	-0.422384
As	0.000000	1.000000	-0.138823	1.000000	0.000000	-0.068288
Cr	0.641201	0.000000	0.798715	0.000000	1.000000	-0.121133
pH	0.077560	-0.068288	-0.422384	-0.068288	-0.121133	1.000000

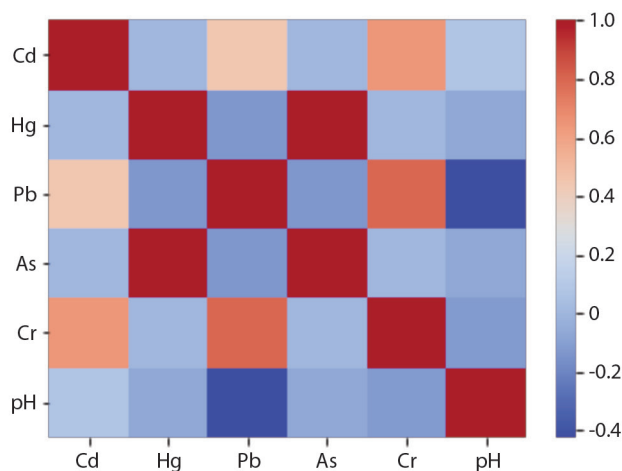


Fig. 5. Mapa de calor para las concentraciones de metales pesados en muestras de suelo. / **Fig. 5.** Heat map for heavy metal concentrations in soil samples.

observando una tendencia al aumento en la concentración pasado el tiempo de 3 a 9 meses para cadmio, plomo y cromo. Dicha tendencia al aumento debe ser vista desde correlaciones entre la disponibilidad en material vegetal y suelo. Esta correlación se establece de acuerdo con lo observado en el mapa de calor Fig. 5 y la Tabla 4 de correlación entre los metales y el pH.

Respecto a las correlaciones mostradas por el mapa de calor (Fig. 6) y sus dendrogramas, es evidente que las relaciones positivas entre el Hg y el As se deben a sus concentraciones y disponibilidad igualitarias. Frente a los otros metales se resalta que están presentando correlaciones en órdenes cercanos a uno, lo que permite inferir que Cd, Pb y Cr como se evidenció anteriormente tienen aportes significativos. Como se puede observar una de las variables

que también se incluye en el mapa de calor es el pH, donde es posible observar que tiene una influencia positiva en la distribución de los metales en el suelo y por ende en el tejido.

Mediante el análisis de correlación entre el plomo y el pH por medio del gráfico de dispersión (Fig. 7), se evidencia una acumulación de datos en torno a un pH entre 5.5 y 6.0. Dicha acumulación de datos permite describir la posibilidad de obtener pH óptimos y de mayor absorción de este tipo de metales desde los suelos hacia la planta. Dicho esto, se resalta una vez más la fuerte relación entre el pH de un suelo y el movimiento de los metales, haciéndolos biodisponibles a diferentes concentraciones.

De modo generalizado en la matriz de coeficientes entre las variables anteriores (pH y metales) (Fig. 8), se puede observar como el

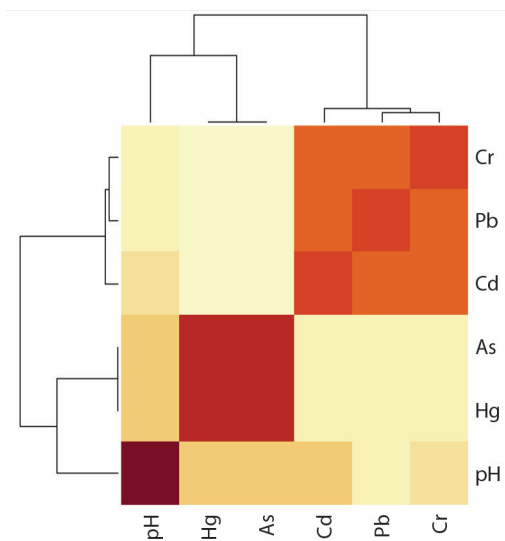


Fig. 6. Mapa de calor con dendrogramas correlacionando pH y concentraciones de metales pesados en muestras de suelo. / **Fig. 6.** Heat map with dendrograms correlating pH and heavy metal concentrations in soil samples.

caso la variación de potenciométrica y cadmio parece ser que la tendencia es contraria. De esta manera, se observa una acumulación de datos en torno a las medidas entre 5.5 y 6.0 como se mencionó anteriormente.

DISCUSIÓN

Las concentraciones de los metales pesados reportados en este estudio y presentados en la Tabla 2 para las muestras de suelo ubicado en La Granja Experimental Mosquera, permitieron observar la acumulación de plomo, cromo y cadmio (Pb, Cr y Cd) en mayores proporciones respecto a mercurio y arsénico. A partir de estos datos se realizaron pruebas estadísticas que facilitaron el análisis de las variables.

De lo anterior, se logró evidenciar a través de algunos estadísticos básicos que los datos presentaban una varianza alta, pocos valores medios y representaciones de las

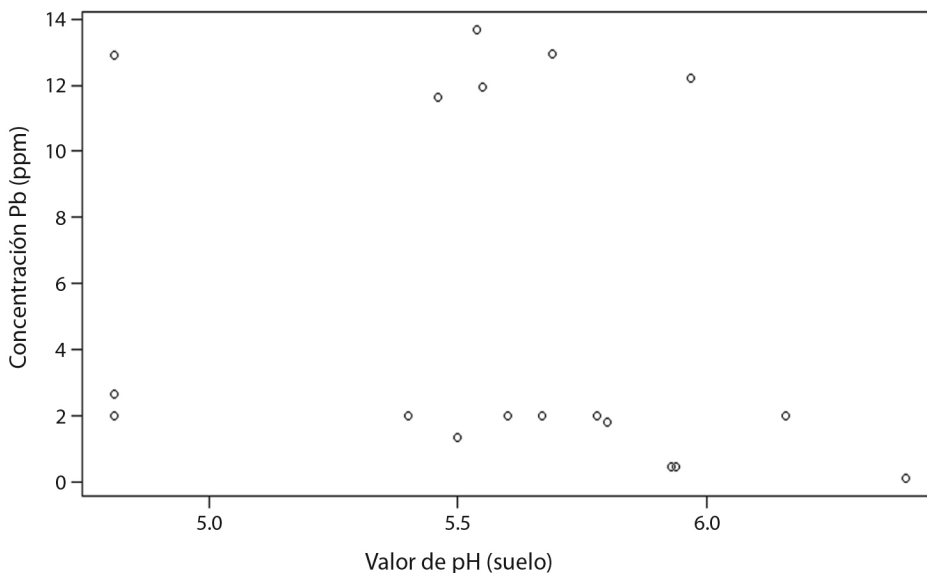


Fig. 7. Gráfico de dispersión correlacionando pH y concentraciones de Pb en muestras de suelo. / **Fig. 7.** Scatter plot correlating pH and Pb concentrations in soil samples.

plomo puede llegar a concentraciones bajas si existen valores de pH altos, pero que a concentraciones altas de plomo el pH no supera los 6 puntos. Es así como lo anterior, es una correlación débil pero existente, mientras que en el

caso de los otros tres metales, Pb, Cd y Cr presentaron intervalos de sus valores entre 0.140-13.667; 0.457- 4.090 y 0.050-9.520 respectivamente. Por tal motivo,

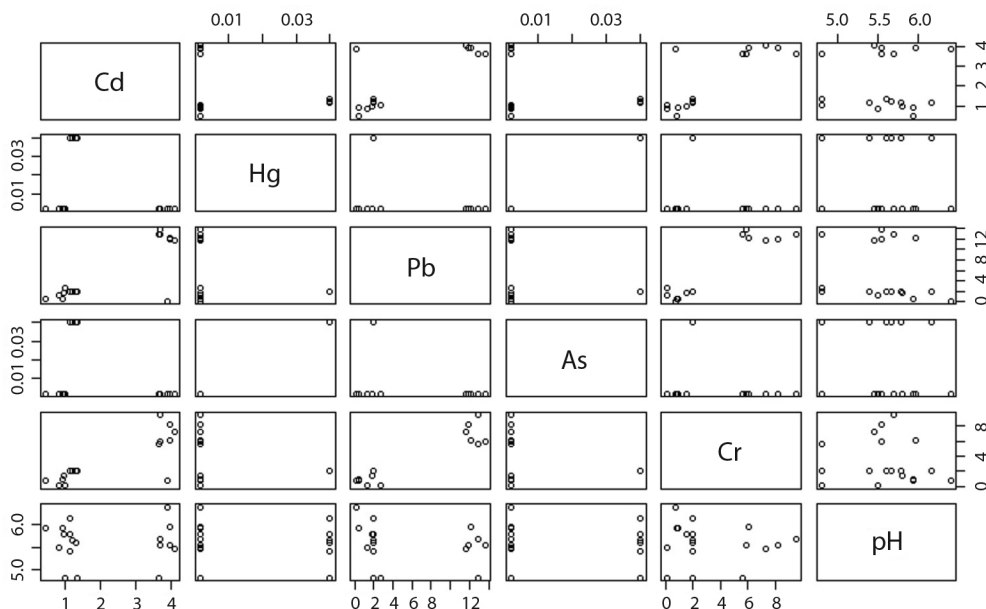


Fig. 8. Gráficos de dispersión correlacionando pH y concentraciones de metales pesados en muestras de suelo. / **Fig. 8.** Scatter plots correlating pH and heavy metal concentrations in soil samples.

es importante aclarar que la dispersión de los datos es significativa y se requirió de métodos de normalización.

Dichos métodos permitieron correlacionar los datos en matrices (Tabla 4), estas correlaciones evidenciaron la relación estrecha existente entre Pb, Cd y Cr con valores cercanos a 1, asimismo la correlación de estos tres con valores de pH entre 5.5 a 6.0 en suelos. De esta manera es posible afirmar que, en el rango de pH propuesto, el Cd se bioacumula en el tejido vegetal observado esto en la Fig. 3, por esto la concentración no aumenta en el suelo. Por otro lado, los metales Pb y Cr en este mismo rango de pH tienden a acumularse en el suelo (Fig. 4) esto debido a que movilizar e incrementar la biodisponibilidad de metales pesados se ve afectado por el potencial redox (Beltrán-Pineda & Gómez-Rodríguez, 2016), determinando con esto que el intervalo de pH benefició la movilidad de Cd hacia la planta, pero redujo la movilidad de Pb y Cr en el suelo.

En términos de tejido vegetal y efectuado el análisis respecto a las proporciones de cilantro y brócoli en las parcelas propuestas,

se puede evidenciar que la concentración de metales es mayor en partes aéreas de Cilantro que de Brócoli. Lo anterior se podría relacionar con que el Cilantro posee una mayor tolerancia, mejores procesos de transporte y metabolismo relacionados con péptidos como fitoquelatinas y metalotioneinas, y algunos ácidos orgánicos que facilitan la bioacumulación de este tipo de metales pesados (Delgadillo-López et al., 2011). De otro lado, respecto a las proporciones definidas como 70/30 y 30/70 de cilantro-brócoli se permite inferir que el brócoli es una especie perteneciente a una familia que posee unas características de ser hiperacumuladoras según (Beltrán-Pineda & Gómez-Rodríguez, 2016; Delgadillo-López et al., 2011). De esta manera y según lo establecido se infiere que dicha especie actúa como un agente de regulación en la adsorción de metales para la otra especie vegetal, mediante diversos mecanismos externos de tolerancia como por ejemplo por microorganismos asociados íntimamente con la raíz. Lo anterior lo menciona González-Mendoza y Zapata-Pérez (2008) en el que hongos micorrícicos forman asociaciones mutualistas

que permiten mejorar la bioacumulación de los metales pesados en la planta (González-Mendoza & Zapata-Pérez, 2008).

Adicionalmente se pudo correlacionar que el pH del suelo facilitó la bioacumulación de Cd, Pb y Cr resaltando una concentración más alta de Cd a un pH entre 5.5 y 6.0 en parcelas 70/30 o 30/70 de cilantro. Esta propiedad química del suelo (pH) permitió la absorción de metales pesados por parte de la especie vegetal “cilantro” cuyos resultados son promisorios y no hay un amplio número de estudios publicados con la capacidad de esta especie para acumular metales pesados como Cd, Pb y Cr.

Los resultados anteriormente mencionados permitieron concluir que las parcelas en proporciones 70/30 o 30/70 de cilantro-brócoli son las que mejor podrían presentar un proceso de bioacumulación de metales pesados en términos de fitorremediación usando especies vegetales como brócoli y cilantro. Estas especies como fue mencionado anteriormente son hortalizas de ciclo corto que cuentan con mecanismos para la captación de metales. Estas especies además son fácilmente cultivables lo que permite una remediación del suelo en corto tiempo.

Declaración de ética: los autores declaran que todos están de acuerdo con esta publicación y que han hecho aportes que justifican su autoría; que no hay conflicto de interés de ningún tipo; y que han cumplido con todos los requisitos y procedimientos éticos y legales pertinentes. Todas las fuentes de financiamiento se detallan plena y claramente en la sección de agradecimientos. El respectivo documento legal firmado se encuentra en los archivos de la revista.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Corporación Universitaria Minuto de Dios-UNIMINUTO que por medio del proyecto “Recuperación biológica de suelos para el establecimiento de producción agroecológica de alimentos a partir de biorremediación en la granja

UNIMINUTO-Mosquera”, código 200-IN-1-18-035 financió la investigación asociada a este documento.

REFERENCIAS

- Beltrán-Pineda, M. E., & Gómez-Rodríguez, A. M. (2016). Biorremediación de metales pesados cadmio (Cd), cromo (Cr) y mercurio (Hg), mecanismos bioquímicos e ingeniería genética: una revisión. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*, 12(2), 172–197.
- Combariza, D. (2009). *Contaminación por metales pesados en el embalse del Muña y su relación con los niveles en sangre de plomo, mercurio y cadmio y alteraciones de salud en los habitantes del municipio de Sibate-Cundinamarca* (Tesis de Maestría). Universidad Nacional de Colombia, Colombia.
- Corporación Autónoma Regional. (2006). *Objetivos de calidad de agua para la cuenca del río Bogotá a lograr en el año 2020*. Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca.
- Cristaldi, A., Conti, G., Jho, E., Zuccarelo, P., Grasso, A., Copat, C., & Ferrante, M. (2017). Phytoremediation of contaminated soils by heavy metals and PAHs. A brief review. *Environmental Technology & Innovation*, 8(2017), 309–326.
- Delgadillo-López, A. E., González-Ramírez, C. A., Prieto-García, F., Villagómez-Ibarra, J. R., & Acevedo-Sandoval, O. (2011). Fitorremediación: una alternativa para eliminar la contaminación. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 14(2), 597–612.
- Fernández, W., Oyuela, M., & Gutiérrez, M. (2017). Native herbaceous plant species with potential use in phytoremediation of heavy metals, spotlight on wetlands-A review. *Chemopere*, 168(2017), 1230–1247.
- Fundación de Asesorías para el Sector Rural Ciudad de Dios. (2021). *Metodología de análisis de Laboratorio-Fundación de Asesorías para el Sector Rural*. FUNDASES.
- Ghosh, M., & Singh, S. (2005). A review on phytoremediation of heavy metals and utilization of it's by products. *Applied Ecology and Environmental Research*, 3(1), 1–18.
- González-Mendoza, D., & Zapata-Pérez, O. (2008). Mecanismos de tolerancia a elementos potencialmente tóxicos en plantas. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 82(2008), 53–61.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (1990). *Métodos analíticos del laboratorio de suelos*. Colombia.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2011). *Reporte de áreas afectadas por inundaciones 2010-2011*. Colombia.



- Kadiri, L., Lebkiri, A., Rifi, E., Ouass, A., Essaadaoui, Y., Lebkiri, I., & Hamad, H. (2018). Kinetic studies of adsorption of Cu (II) from aqueous solution by coriander seeds (*Coriandrum sativum*). *E3S Web of Conferences*, 37(2018), 02005.
- Lizarazo, M., Herrera, C., Celis, C., Pombo, L., Teheran, A., Piñeros, L., Forero, S., Velandia, R., Díaz, F., Andrade, W., & Rodríguez, O. (2020). Contamination of staple crops by heavy metals in Sibate, Colombia. *Heliyon*, 6(7), e04212.
- Mani, D., & Kumar, C. (2014). Biotechnological advances in bioremediation of heavy metals contaminated ecosystems: An overview with special reference to phytoremediation. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 11(3), 843–872.
- Martínez, F. L. (2013). *Gestión del riesgo de desastres en el municipio de Mosquera* (Tesis de Pregrado). Universidad Colegio Mayor Nuestra Señora del Rosario, Colombia.
- Micó, C., Recatalá, L., Peris, M., & Sánchez, J. (2006). Assessing heavy metal sources in agricultural soils of an European Mediterranean area by multivariate analysis. *Chemosphere* 65(5), 863–872.
- Miranda, D., Carranza, C., Rojas, C. A., Jerez, C., Fischer, G., & Zurita, J. (2008). Acumulación de metales pesados en suelos y plantas de cuatro cultivos hortícolas, regados con agua del río Bogotá. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 2(2), 180–191.
- Mourato, M. P., Moreira, I. N., Leitão, I., Pinto, F. R., Sales, J. R., & Louro-Martins, L. (2015). Effect of heavy metals in plants of the genus *Brassica*. *International of Molecular Science* 16(8), 17975–17998.
- Ruíz, J. (2011). Evaluación de tratamientos para disminuir cadmio en lechuga (*Lactuca sativa* L.) irrigada con agua del río Bogotá. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 5(2), 233–243.
- Soil Survey Staff. (2014). *Keys to Soil Taxonomy* (12^{va} Ed.). Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service.
- Weatherspark. (20 de marzo de 2022). *Datos históricos meteorológicos*. <https://es.weatherspark.com/>