

# Omisión de macronutrientes y biodisponibilidad de cadmio en suelos de Ecuador

## Omission of macronutrients and bioavailability of cadmium in soils of Ecuador

Juan Xavier Valarezo <sup>1,3</sup>, Manuel Danilo Carrillo Zenteno <sup>1,4</sup>, Galo Alexander Rubio Zapata <sup>1,5</sup>,  
Karina Elizabeth Peña Salazar <sup>1,6</sup>, Yelitza García-Orellana <sup>1,2,7,8</sup>.

<sup>1</sup>Estación Experimental Tropical Pichilingue. Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias INIAP. Mocache, Los Ríos, Ecuador. <sup>2</sup>Universidad Centroccidental "Lisandro Alvarado". Venezuela. <sup>3</sup> ✉ [juan9xavier1995@gmail.com](mailto:juan9xavier1995@gmail.com); <sup>4</sup> ✉ [manuel.carrillo@iniap.gob.ec](mailto:manuel.carrillo@iniap.gob.ec); <sup>5</sup> ✉ [alezrz17@gmail.com](mailto:alezrz17@gmail.com); <sup>6</sup> ✉ [karina.pena@iniap.gob.ec](mailto:karina.pena@iniap.gob.ec); <sup>8</sup> ✉ [yelitzagarcia@ucla.edu](mailto:yelitzagarcia@ucla.edu)



<https://doi.org/10.15446/acag.v71n3.105855>

2022 | 71-3 p 248-257 | ISSN 0120-2812 | e-ISSN 2323-0118 | Rec.: 2022-11-16 Acep.: 2023-03-10

### Resumen

El cadmio (Cd) está presente en los suelos cacaoteros del Ecuador; esto puede ser resultado de diversas actividades antrópicas como la agricultura, la minería, el transporte, etc. Ello podría causar problemas en la comercialización de los productos agrícolas a nivel nacional e internacional y también en la salud de los consumidores, al ser absorbido por las plantas e ingresando en la cadena trófica. Para reducir la absorción de Cd del suelo, se evaluaron los efectos de la omisión de macronutrientes sobre la absorción de Cd por plantas de arroz en seis suelos tropicales del Ecuador; para ello, se realizó un ensayo en condiciones de invernadero, donde se evaluaron nueve tratamientos: testigo 1 (sin fertilización y sin Cd), un testigo 2 (sin fertilización con Cd), fertilización completa (N, P, K, S, Mg, Ca) y los seis tratamientos restantes de omisión de un nutriente a la vez, usando un diseño de experimentos de bloques completos al azar, con parcelas divididas, lo cual fue replicado tres veces. Las variables evaluadas fueron comparadas empleando las pruebas de Tukey y Bonferroni con un valor de  $P < 0.05$ . Los resultados encontrados muestran que la fertilización completa estimula la absorción de Cd en los suelos de las seis provincias evaluadas (Esmeraldas, Manabí, Guayas, El Oro, Los Ríos y Sucumbíos); además, las omisiones de los nutrientes afectaron la absorción del Cd, variando independientemente de las características del suelo, por lo que se considera esta técnica como una alternativa válida para evaluar la absorción de Cd bajo diferentes condiciones edafoclimáticas y garantizar la inocuidad del producto que va a ser consumido por la población.

**Palabras claves:** absorción, fertilización, inocuidad, metales pesados, translocación.

### Abstract

Cadmium (Cd) is present in the cocoa soils of Ecuador, which and can be the result of various anthropogenic activities such as agriculture, mining, transportation, etc. It can cause problems in the marketing of agricultural products nationally and internationally, and also in consumers' health, as it is absorbed by plants and enters the food chain. The effects of omitting macronutrients on the absorption of Cd by rice plants were evaluated in six tropical soils of Ecuador in aim to reduce the absorption of Cd from the soil. For this, a trial was carried out under greenhouse conditions where nine treatments were evaluated: control 1 (without fertilization and without Cd), a control 2 (without fertilization with Cd), complete fertilization (N, P, K, S, Mg, Ca) and the remaining six treatments, omission of a nutrient at a time, using a randomized complete block experiment design with divided plots replicated three times. The variables evaluated were compared using the Tukey and Bonferroni tests with a value of  $P < 0.05$ . The results found show that complete fertilization stimulated Cd absorption in the soils of the six provinces evaluated (Esmeraldas, Manabí, Guayas, El Oro, Los Ríos y Sucumbíos); in addition, the omission of nutrients affected Cd absorption, varying independently of soil characteristics, so this technique is considered a valid alternative to evaluate Cd absorption under different edaphoclimatic conditions and to guarantee the safety of the product to be consumed by the population.

**Keys word:** absorption, fertilization, safety, heavy metal, translocation.

## Introducción

Las características de los suelos son variables a nivel mundial, regional y específicamente en el Ecuador, país que, por tener tres regiones geográficas, presenta suelos de origen volcánico, mineral, aluvial, sedimentario, etc. En el trópico predominan los dos últimos, que difieren en su fertilidad (Hidalgo-Moreno *et al.*, 2022) y pueden presentar problemas por presencia de metales pesados, especialmente por Cd, que se encuentra bajo diferentes formas disponibles (Muyulema-Allaica *et al.*, 2019).

La presencia del Cd en el suelo puede ser producto de actividades antrópicas como minería, agricultura (Soto-Benavente *et al.*, 2020), aguas de riego (Pilco y García, 2020), uso de combustibles fósiles, etc. (Rosales-Huamaní *et al.*, 2021) o por procesos naturales, como producto de meteorización de rocas o por la deposición de cenizas volcánicas (Kubier *et al.*, 2019), que, al no sufrir degradación microbiana o química, podría permanecer durante mucho tiempo disponible (Romero-Estévez *et al.*, 2022). De igual manera, ingresa en la cadena trófica en el consumo de vegetales contaminados que pueden provocar efectos tóxicos en animales y humanos (Ochoa *et al.*, 2020). Así, valores superiores a 20 mg kg<sup>-1</sup> presentes en el riñón (Tsai *et al.*, 2021) provocan trastornos a la salud de las personas, por tanto, el Codex Alimentarius ha normado su presencia en productos de consumo; por ejemplo, el chocolate con  $\geq 50\%$  a  $< 70\%$  de sólidos de cacao no debe sobrepasar 0.8 mg kg<sup>-1</sup> de Cd (Meter *et al.*, 2019).

Numerosos estudios de remediación de suelos con niveles elevados de Cd se han realizado utilizando técnicas de fitorremediación (Hesami *et al.*, 2018; Mahajan y Kaushal, 2018; Konkolewska *et al.*, 2020) o fijación (Sakpirom *et al.*, 2019), todos intentando disminuir la biodisponibilidad del Cd en el suelo. Para ello, se utilizan plantas bioextractoras, como el arroz, que son excelentes bioindicadoras de la disponibilidad del Cd (Khaliq *et al.*, 2019; Qiu *et al.*, 2019) al absorberlo del suelo por las raíces y distribuirlo por todas las partes de la planta (Sterckeman y Thomine, 2020).

La técnica del elemento faltante u omisión de nutrientes es muy utilizada en trabajos de fertilidad del suelo y nutrición de cultivos como maíz, arroz, papa, etc. (Hasang *et al.*, 2018; Alves *et al.*, 2019), con ella se consigue determinar el impacto que tiene el no aplicar un elemento sobre el rendimiento de los cultivos. Bajo esta premisa, se pretende conocer el efecto de la omisión de macronutrientes sobre la absorción de Cd por plantas de arroz, cuyo propósito es obtener granos de arroz libres de contaminantes.

Por lo tanto, una alternativa para disminuir la biodisponibilidad del Cd en el suelo es la competencia entre iones, pues la ausencia de uno podría elevar la absorción de otro o viceversa (Carrillo-González y

González-Chávez, 2015). Es importante determinar el sinergismo (Li *et al.*, 2022) o antagonismo entre elementos (Li *et al.*, 2021), ya que en algunos casos se encuentra un sinergismo entre macronutrientes como el nitrógeno y fósforo (Ulloa y Valle, 2021).

Adicionalmente, se debe analizar la reducción de la absorción de Cd en diferentes tipos de suelo, dado que la eficiencia de la técnica de omisión está muy relacionada con las condiciones edafoclimáticas de la zona donde se aplique. La reducción de la absorción de Cd es más eficiente en suelos alcalinos que en suelos ácidos (Hamid *et al.*, 2018), lo cual es importante debido a la variabilidad de suelos de las zonas tropicales del Ecuador.

Por lo indicado, es necesario evaluar métodos de manejo de suelos según las condiciones de fertilidad para disminuir la disponibilidad de Cd, su absorción por las plantas y su presencia en los alimentos de consumo humano; por tanto, esta investigación se desarrolló con el objetivo de conocer la respuesta en absorción de Cd por plantas de arroz sembradas en seis suelos tropicales y sometidas a diferentes tratamientos de fertilización bajo la técnica del elemento faltante.

## Materiales y métodos

### Ubicación geográfica

La investigación se realizó en el invernadero y laboratorio del Departamento de Manejo de Suelos y Aguas (DMSA) de la Estación Experimental Tropical Pichilingue (EETP) del Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP), ubicada en el km 5 vía Quevedo - El Empalme, cantón Mocache, Provincia de Los Ríos, geográficamente localizada en las coordenadas 01° 06' Latitud Sur y 79° 28' Longitud Oeste; con altitud de 120 m.s.n.m. (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología, INAMHI, 2016).

### Suelos

Los suelos para el estudio fueron recolectados en zonas sembradas con cacao, ubicadas en las seis provincias: Esmeraldas, Manabí, Guayas, El Oro, Los Ríos y Sucumbíos (Tabla 1), donde se tomaron muestras en los primeros 0.10 m superficiales de suelo mineral, en cantidad suficiente para llenar los recipientes utilizados. Para el análisis de textura se utilizó el método de Boyoucus (Klein, 2008), para el pH se utilizó una relación suelo: agua de 1:2.5 (Quezada *et al.*, 2017); la materia orgánica se utilizó el método de Walkley-Black; el P se analizó por colorimetría; el Cd se analizó utilizando agua regia (HNO<sub>3</sub> y HCl concentrado, proporción 3:1) mediante absorción atómica, la cual también fue utilizada para cuantificar el S, usando como fosfato como extractante calcio monobásico y todos los cationes, utilizando como extractante Olsen modificado.

**Tabla 1.** Coordenadas geográficas de los sitios de recolección de muestras de suelos para la investigación

Provincia	Coordenadas geográficas	
Esmeraldas	N 01° 13' 17.7"	O 078°45'55.5'
Manabí	S 00° 47' 58.8"	O 080° 08' 08.0"
Guayas	S 2° 22' 21"	O 80° 14' 23'
El Oro	S 3° 23' 29.256"	O 079° 50' 33.136"
Los Ríos	S 1° 04' 21.4"	O 079° 29' 24.6"
Sucumbíos	S 0° 16' 25.531"	O 070° 56' 16.514"

Las características físicas y químicas de los suelos analizados se presentan en la Tabla 2, que corresponden a las muestras provenientes de las provincias de Esmeraldas, Manabí, Guayas, El Oro, Los Ríos y Sucumbíos, donde se observa una gran variabilidad producto de sus condiciones edafoclimáticas.

## Factores en estudio

En el desarrollo de la investigación fueron evaluados los factores suelos (seis suelos tropicales), cada uno sometido a nueve tratamientos de fertilización (testigo absoluto; testigo + Cd; fertilización completa N-P-K-S-Mg-Ca; y los seis tratamientos restantes aplicando la metodología de omisión de nutrientes para cada uno de los seis nutrientes antes mencionados), lo cual dio un total de 54 tratamientos. Todos fueron instalados con tres repeticiones, lo que arrojó 162 unidades

experimentales siguiendo un diseño de bloques completos al azar con parcelas divididas, en los que las parcelas grandes correspondieron a los suelos y las pequeñas a las omisiones de nutrientes (Tabla 3).

## Contaminación del suelo

Para asegurar la disponibilidad de Cd se contaminó el suelo con 3 mg kg<sup>-1</sup> de Cd utilizando cloruro de cadmio (CdCl<sub>2</sub>), tal como fue empleado por Carrillo-Zenteno *et al.* (2022). Se utilizaron fundas plásticas transparentes y gruesas (0.20 x 0.38 m), donde se colocó por triplicado 1 kg de cada suelo y se añadieron 10 mL de una solución de 3 mg kg<sup>-1</sup> de Cd. Seguidamente se humedeció con agua desionizada (sistema Barnstead E-pure) hasta capacidad de campo. En estas condiciones se mantuvieron los suelos por un mes; una vez estuvo finalizada la incubación, estos fueron secados a temperatura ambiente en invernadero, molidos en mortero de cerámica, pasados por tamiz de 2 mm y fueron pesados 100.0 g de suelo en recipientes de 100 cm<sup>3</sup> de capacidad, previamente identificados según el tratamiento.

## Biodisponibilidad de Cd

Para conocer la biodisponibilidad del Cd, se utilizó el método de Neubauer (Fernandes *et al.* 2012); se trasplantaron 25 semillas pregerminadas de arroz de la variedad INIAP-12. La pregerminación consistió en colocar por un día semillas de arroz sobre papel

**Tabla 2.** Características químicas, físicas y clasificación de seis suelos tropicales del Ecuador

Provincia	Clasificación taxonómica <sup>1</sup>	pH	P	S	Cd	K	Ca	Mg	MO	Arena	Limo	Arcilla	Clase textural
			mg kg <sup>-1</sup>			meq 100 mL <sup>-1</sup>			dag kg <sup>-1</sup>				
Esmeraldas	Cambisol dístrico	4.7	2	13	1.11	0.51	7	2	3.4	29	45	26	A
Manabí	Cambisol éútrico	6.8	89	14	1.25	2.00	19	6	2.1	15	39	46	FA
Guayas	Cambisol éútrico	7.9	48	5	1.79	1.54	20	3	1.0	15	27	58	FL
El Oro	Fluvisol éútrico	6.2	23	6	1.54	0.49	19	3	2.3	31	29	40	FA
Los Ríos	Fluvisol éútrico	5.0	38	9	1.52	0.70	7	2	3.6	35	19	46	F
Sucumbíos	Dystric cambisols	4.0	13	26	1.61	0.10	2	1	0.4	9	73	18	A

<sup>1</sup> Gardi *et al.* (2014)

**Tabla 3.** Tratamientos evaluados para determinar la biodisponibilidad de Cd en suelos tropicales del Ecuador por efecto de la omisión de nutrientes

Suelo *	Fertilización	Suelo*	Fertilización								
1	Testigo	2	Testigo	3	Testigo	4	Testigo	5	Testigo	6	Testigo
1	Testigo + Cd	2	Testigo + Cd	3	Testigo + Cd	4	Testigo + Cd	5	Testigo + Cd	6	Testigo + Cd
1	NPKSMgCa	2	NPKSMgCa	3	NPKSMgCa	4	NPKSMgCa	5	NPKSMgCa	6	NPKSMgCa
1	-PKSMgCa	2	-PKSMgCa	3	-PKSMgCa	4	-PKSMgCa	5	-PKSMgCa	6	-PKSMgCa
1	N-KSMgCa	2	N-KSMgCa	3	N-KSMgCa	4	N-KSMgCa	5	N-KSMgCa	6	N-KSMgCa
1	NP-SMgCa	2	NP-SMgCa	3	NP-SMgCa	4	NP-SMgCa	5	NP-SMgCa	6	NP-SMgCa
1	NPK-MgCa	2	NPK-MgCa	3	NPK-MgCa	4	NPK-MgCa	5	NPK-MgCa	6	NPK-MgCa
1	NPKS-Ca	2	NPKS-Ca	3	NPKS-Ca	4	NPKS-Ca	5	NPKS-Ca	6	NPKS-Ca
1	NPKSMg-	2	NPKSMg-	3	NPKSMg-	4	NPKSMg-	5	NPKSMg-	6	NPKSMg-

\*Suelo 1 - Esmeraldas; 2 - Guayas; 3 - Manabí; 4 - Los Ríos; 5 - El Oro; 6 - Sucumbíos.

absorbente humedecido con agua ultrapura, después fueron tapadas por dos días con funda plástica negra, periodo en el cual emergió la radícula.

## Preparación de tratamientos

Las soluciones nutritivas para aplicar los tratamientos de omisión de elementos se prepararon utilizando los reactivos  $C_2H_7NO_2$ ,  $Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$ ,  $Mg(NO_3)_2 \cdot (6H_2O)$ ,  $K(NO_3)$ ,  $(NH_4)_2(SO_4)$ ,  $NaH_2PO_4 \cdot H_2O$ ,  $CaCO_3$ ,  $MgCO_3$ ,  $CaCl_2$ ,  $KCl$ ,  $CaH_2O_4P$  y  $K_2SO_4$  tipo p.a. de las marcas J.T Baker, Fluka y Merck y el testigo consistió en agua ultrapura. Las dosis de nutrientes aplicados fueron el equivalente a 1.5 veces las necesidades requeridas por el arroz según interpretación de resultados de análisis de suelos, cuyo equivalente correspondió a  $241.5 \text{ kg ha}^{-1}$  de N,  $103.5 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $P_2O_5$ ,  $90 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $K_2O$ ,  $81 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $MgO$ ,  $66 \text{ kg ha}^{-1}$  de S y  $36 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $CaO$ .

## Análisis estadístico

Se empleó el programa estadístico INFOSTAT (Di Rienzo *et al.*, 2019) para realizar el análisis de varianza de los resultados de las variables estudiadas, y en aquellos casos que fue necesario se hizo la prueba de medias de rangos múltiples de Tukey ( $P < 0.05$ ); así mismo, se realizó un análisis multivariado para comparar la correlación entre todas las variables, a través de los componentes principales y para identificar las variables más importantes que explican los cambios en el comportamiento de los suelos evaluados; también se realizó la prueba de Bonferroni ( $P < 0.05$ ) para conocer la interacción entre los diferentes factores.

## Resultados y discusión

Los resultados muestran que la técnica de omisión de nutrientes fue eficiente en la mayoría de los suelos evaluados, sin embargo, se observó que en algunos casos la exclusión de un nutriente no resultó eficiente en minimizar la absorción de Cd y en otros casos las características edáficas y el manejo del suelo produjeron una acidificación de este, lo cual puede afectar la disponibilidad del Cd, como se discute a continuación.

### Omisión de nutrientes y tipo de suelo sobre la absorción total de Cd

El primer resultado que se presenta es el efecto de interacción entre la omisión de nutrientes y tipos de suelos (sobre la absorción total de cadmio por la planta de arroz [ $\text{mg kg}^{-1}$ ], cuyos resultados se presentan en la Figura 1, donde se evidencia que la absorción de Cd fue mayor en los suelos de Esmeraldas y Sucumbíos en comparación con resto el de los suelos evaluados. La absorción de Cd fue menor en los suelos de las provincias de El Oro, Guayas y Manabí.

Los resultados obtenidos en los suelos de El Oro, Guayas y Manabí concuerdan con Sadeghipour (2018), quien, al evaluar la concentración de Cd en plantas de frijol sembradas en un suelo franco-arenoso contaminado con  $100 \text{ mg kg}^{-1}$  de Cd y sometido a dosis de 200 y  $400 \text{ mg kg}^{-1}$  de K, determinó que la concentración de Cd se redujo en un 41 % y 46 %, respectivamente.

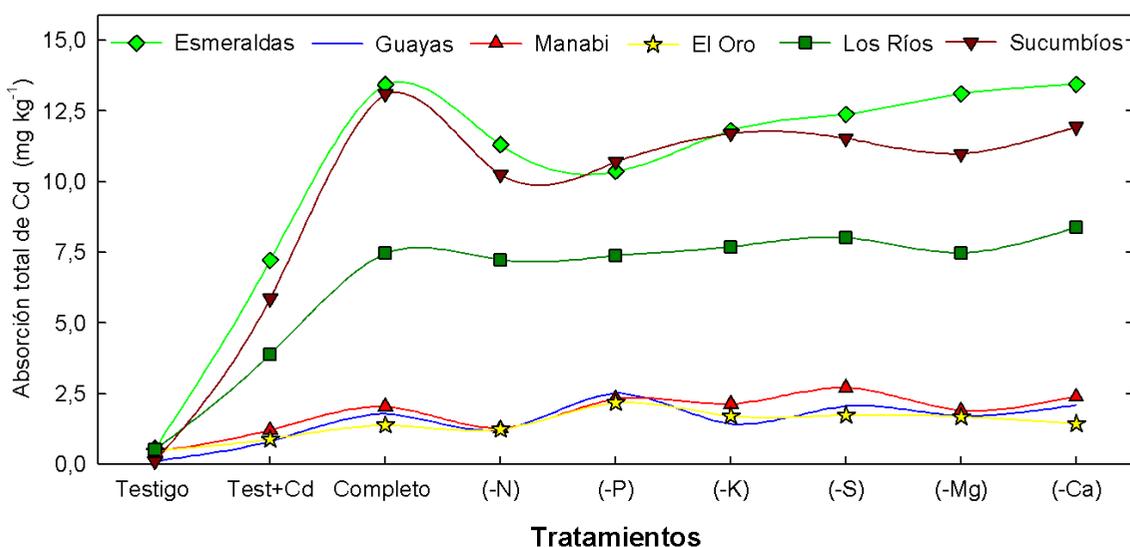


Figura 1. Efectos de la interacción entre la omisión de nutrientes y el tipo de suelo sobre la absorción total de Cd en las plántulas de arroz.

Con relación a la absorción de Cd, esta fue más alta cuando se aplicó la fertilización completa o solamente fueron excluidos el Ca y el Mg, pero se reduce considerablemente cuando es excluido el suministro de N y P, que constituyen los elementos químicos más requeridos en la nutrición mineral de plantas. Sin embargo, debe encontrarse un equilibrio entre la cantidad de N y P que se va a omitir y los beneficios ambientales generados por la reducción de la absorción de Cd en la planta.

## Concentración de cadmio en la raíz de plantas de arroz

El segundo factor evaluado fue el efecto de la interacción entre la omisión de nutrientes y tipos de suelos sobre la concentración de cadmio en la raíz de la planta de arroz ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) (Figura 2). Los resultados muestran que en los suelos de Sucumbíos la concentración de Cd en las raíces fue mayor, seguido de los suelos de Esmeraldas, mientras que la acumulación de Cd en las raíces fue menor en los suelos de Guayas, Manabí y El Oro; este resultado mostró una reducción significativa del Cd a nivel de las raíces, lo cual puede ser un efecto benéfico desde el punto de vista ambiental.

En relación con los tratamientos evaluados, la concentración en la raíz tuvo un comportamiento similar en el tratamiento donde se aplicó la fórmula completa, pero no se observaron diferencias cuando se omitieron otros nutrientes, cuyos valores fueron estadísticamente similares, pero significativamente superiores al testigo. Este resultado es promisorio, dado que se puede lograr la reducción del Cd en las raíces a través de la exclusión de una menor cantidad de nutrientes, incluso sin recurrir a la no suplementación de N y P, que son los macronutrientes primarios.

Estos resultados pueden explicarse porque en la medida que el pH disminuye, las plantas aumentan absorción del Cd. Diversos autores han encontrado una relación lineal indirecta (Liu *et al.*, 2009), es decir, cuando aumenta el pH en el suelo, el cadmio es removido y adsorbido por los coloides del suelo, restringiendo su movilidad y biodisponibilidad (Furcal-Beriguete y Torres-Morales, 2020). Adicionalmente, dependiendo de la acidez del suelo, la eficiencia de transferencia suelo-planta permite que el cadmio viaje con otros micronutrientes a las partes aéreas de la planta, lo que conduce a una alta acumulación de cadmio en su parte comestible (Khan *et al.*, 2017).

Diversos autores han encontrado que los cambios en el pH inciden de manera importante en la absorción del Cd, dado que las solubilidades de los metales son significativamente más altas en condiciones ácidas (Wan *et al.*, 2019), mientras que la biodisponibilidad se reduce cuando en el suelo los niveles de pH son superiores a seis, debido a que el cadmio tiende a unirse a los compuestos orgánicos y a otros minerales (Hou *et al.*, 2020).

## Concentración de cadmio en la biomasa aérea de plantas de arroz

Una vez evaluada la concentración de Cd en las raíces de plántulas de arroz, se evaluó el efecto de la interacción entre la omisión de nutrientes y los tipos de suelos sobre la concentración de Cd obtenido en la parte aérea de la plántula de arroz (Figura 3). Se observó que la mayor concentración de Cd en la parte aérea de la planta se encontró en los suelos de Esmeraldas, seguida de Los Ríos y Sucumbíos, un comportamiento similar a lo observado en la absorción total de Cd. La menor absorción se encontró en los suelos provenientes de las provincias de Guayas, Manabí y El Oro, donde se logró una

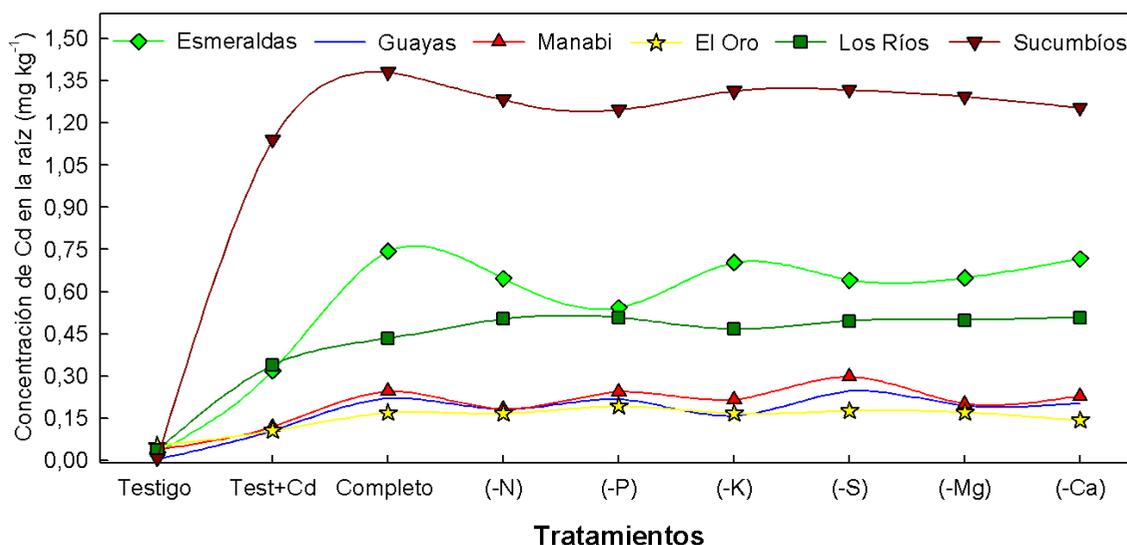


Figura 2. Efectos de la interacción entre la omisión de nutrientes y el tipo de suelo sobre la concentración de Cd en raíces de plántulas de arroz.

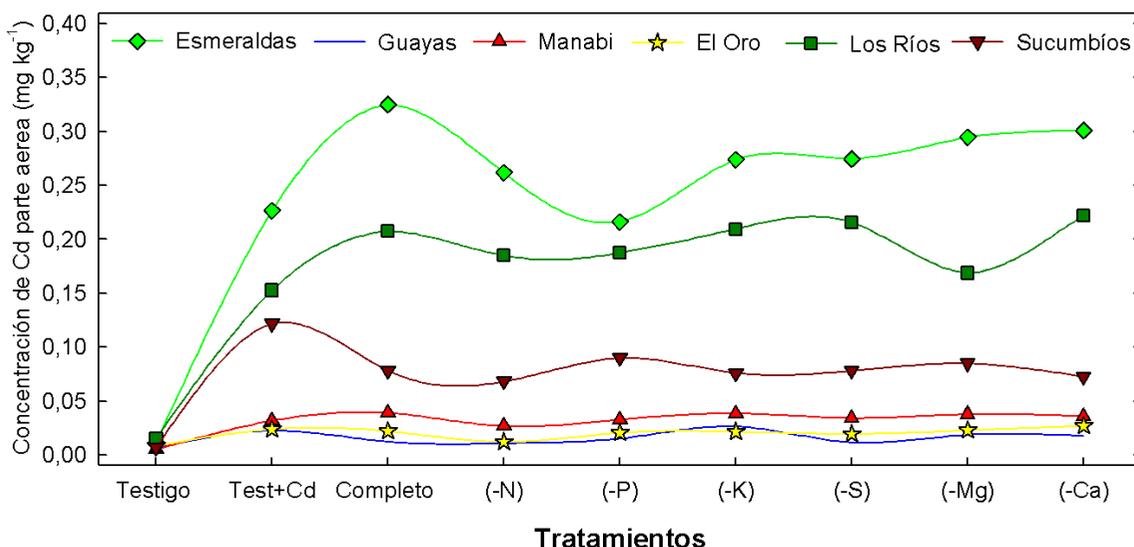


Figura 3. Efectos de la interacción entre la omisión de nutrientes y el tipo de suelo sobre la concentración de Cd en parte aérea de plántulas de arroz.

reducción efectiva del Cd presente en la parte aérea de las plántulas de arroz, lo cual potencializa la inocuidad de los alimentos.

En relación con los tratamientos evaluados, al igual que lo observado en el resto de las variables estudiadas, cuando se aplicó la formulación completa ocurrió mayor absorción, seguido de aquellos tratamientos donde solamente se limitó la suplementación de Ca y Mg a la planta, mientras que la menor concentración de Cd en la parte aérea se observó cuando fue limitado el aporte de P, por lo que se considera que es factible la exclusión de este para poder lograr un adecuada reducción de la absorción de Cd a nivel de la parte aérea.

Por otro lado, se aprecia que con la omisión de nitrógeno (N) se redujo la concentración de Cd en la parte aérea del arroz en todos los suelos, indicativo de sinergismo entre este elemento con el Cd. Estos resultados concuerdan con lo obtenido por Nasraoui-Hajaji *et al.* (2012), quienes también encontraron sinergismo al realizar su investigación en cultivo hidropónico de tomate adicionando 0.5  $\mu\text{M}$  y 25  $\mu\text{M}$  de Cd en forma de  $\text{CdCl}_2$  y sometiéndolo a dos tipos de fertilizantes nitrogenados (nitrato de potasio y sulfato de amonio).

Diversos autores han demostrado que la aplicación de enmiendas al suelo disminuyen los niveles de Cd en las plantas, y afirman que una combinación de ellas pueden disminuir los niveles de Cd en mayor medida que su uso de manera individual, debido a los cambios en la translocación y distribución de Cd entre los tejidos de las plantas y la inhibición de la biodisponibilidad de Cd en el suelo a través de la alteración de las propiedades del suelo (pH, CIC, MO) (Yu *et al.*, 2018; Rahman *et al.*, 2019).

## Absorción de cadmio en plantas de arroz y pH del suelo

Aunque la exclusión de nutrientes tiene un efecto positivo para reducir la acumulación de Cd en las raíces, también puede afectar el pH del suelo, y conducir, en algunos casos, a la acidificación del mismo, por ello se evaluó (Figura 4) la interacción entre la omisión de nutrientes con el pH medido en suelos contaminados con cadmio. Se observa que en los suelos donde se logró una mayor reducción del Cd, como Guayas, Manabí y El Oro, los valores de pH tienden a ser alcalinos, mientras que en aquellos suelos donde los valores de Cd son mayores, el pH tiende a ser ácido.

En relación con los tratamientos, no se observaron diferencias significativas ( $P < 0.05$ ) entre ellos, por lo que la reducción del pH no estuvo relacionada a la exclusión o no de algún macroelemento, sino a las condiciones intrínsecas del suelo que pueden afectar el valor del pH, así como a su manejo.

Los dos primeros suelos están clasificados como oxisoles (Esmeraldas y Sucumbíos), ácidos, con baja CIC; por tanto, con baja capacidad de adsorción de Cd (Gardi *et al.*, 2014). Las concentraciones elevadas encontradas en las raíces y en la parte aérea, se debe a que el Cd adicionado no podía lixiviarse; por tanto, podía ser fácilmente absorbido y traslocado por las plantas.

Uno de los factores determinantes en la absorción de cadmio es el pH: a medida que este disminuye, aumenta la absorción del Cd por parte de las plantas. Esto se debe a que, cuando el pH del suelo aumenta, el cadmio es removido y adsorbido por los coloides del suelo, restringiendo de esta manera su movilidad

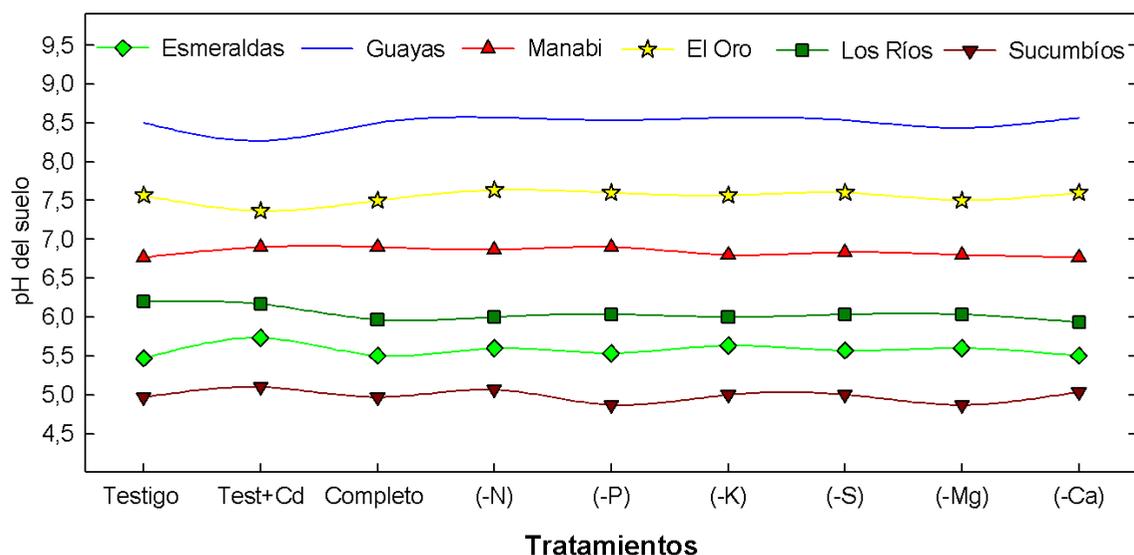


Figura 4. Efectos de la interacción entre la omisión de nutrientes y el tipo de suelo, analizados sobre el pH de suelos con Cd y sembrados con plántulas de arroz.

y biodisponibilidad. Shen *et al.* (2019) afirman que las enmiendas orgánicas, así como la fertilización química en altas dosis, incrementan el pH del suelo, disminuyendo la biodisponibilidad de Cd.

### Absorción de cadmio en plantas de arroz y pH de la rizosfera

Cuando se evaluó la interacción entre la omisión de nutrientes y los tipos de suelos sobre el pH medido en la rizosfera del suelo contaminado con cadmio, los resultados fueron similares a los observados a nivel edáfico (Figura 5), donde se observa que los suelos en los que la reducción del Cd fue mayor presentaron valores altos de pH, mientras que en los suelos donde la absorción de Cd fue mayor el pH del suelo tienden a ser ácido.

Estos resultados coinciden con los reportados por He *et al.* (2015), quienes afirman que la disminución del pH del suelo provoca incrementos en la absorción del Cd por las plantas; sin embargo, existe un punto de inflexión en la disponibilidad del Cd cuando el pH llega a seis, tal como lo muestran los resultados presentados por Meng *et al.* (2019), quienes encontraron que las enmiendas del suelo aumentaron significativamente el pH de este y redujeron la biodisponibilidad de Cd, y se encontró que en el análisis de regresión lineal el Cd se correlacionó significativa y positivamente con el aumento del pH del suelo ( $P < 0.001$ ), lo cual reportó que las enmiendas del suelo fueron eficientes para reducir la absorción de Cd por la raíz del arroz, así como la translocación de la raíz a las partes aéreas de la planta.

En relación a los tratamientos, al igual que lo observado a nivel edáfico, la exclusión o no del algún elemento no conduce a cambios significativos del pH,

a excepción del suelo proveniente de la provincia de Sucumbíos donde se observa una acidificación del suelo cuando es ocluido el P y en Los Ríos cuando es ocluido el K, sin embargo, en la mayoría de los suelos, los cambios en el pH son condicionados por las condiciones edáficas del mismo y su manejo.

### Factor de translocación

El factor de translocación del Cd desde la raíz a la parte aérea fue escaso en todos los suelos, por efecto de la fertilización completa, mientras que los efectos de las omisiones fueron variables entre los suelos (Figura 6). Para el suelo de Esmeraldas, las omisiones de S y Mg provocaron reducciones en la translocación del Cd en el orden de 11.4 % y 14.3 %. En el suelo del Guayas, se redujo en 26.7 % y 46.7 % con las omisiones de P y S. En el suelo de Manabí, se consiguió reducir en 1.7 % y 6.8 % con las omisiones de Mg y N.

Para el suelo de El Oro, con omisiones de P y N, se redujo la translocación en 47.7 % y 52.3 %, en su orden. En el suelo de Los Ríos, la translocación fue reducida en 29.4 % con las omisiones de Mg y N y en el suelo proveniente de la provincia de Sucumbíos el P, Mg y S se redujeron en 40 % los dos primeros y 20 % el último. Estos elementos no deberían ser considerados, al menos por un lapso de tiempo, en los planes de fertilización, por cuanto sus adiciones elevarían los contenidos de Cd en la parte aérea de las plantas.

Deng *et al.* (2020) encontraron que el uso racional de fertilizantes completos en arroz no solo contribuye a proporcionar los nutrientes básicos para promover su crecimiento normal, sino que también aumentó el pH del suelo y, por lo tanto, redujo la biodisponibilidad de Cd en él. Una aplicación inicial,

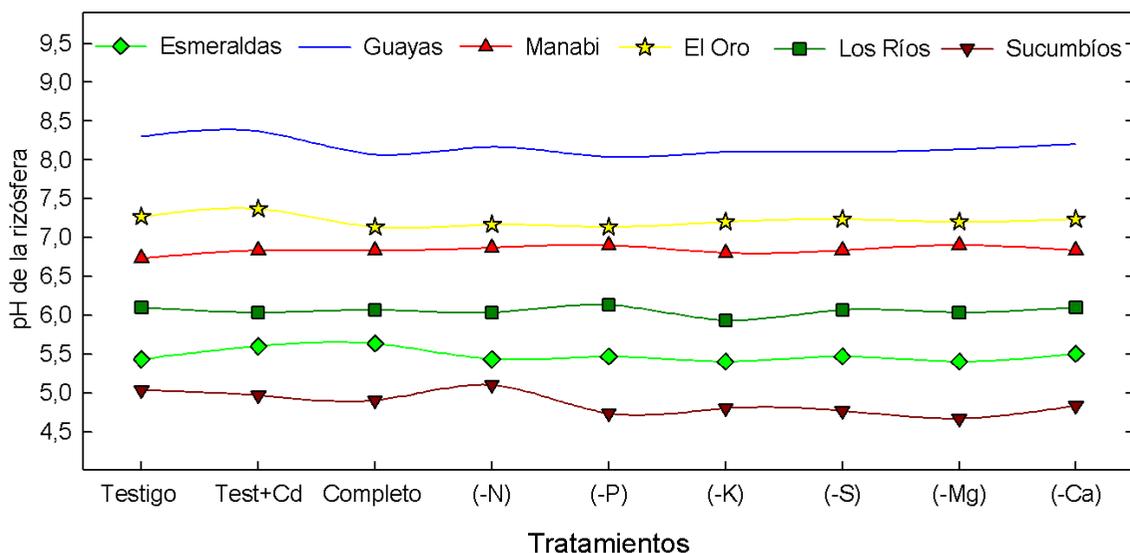


Figura 5. Efectos de la interacción entre la omisión de nutrientes y el tipo de suelo sobre el pH de la rizósfera con Cd sembrado con plántulas de arroz.

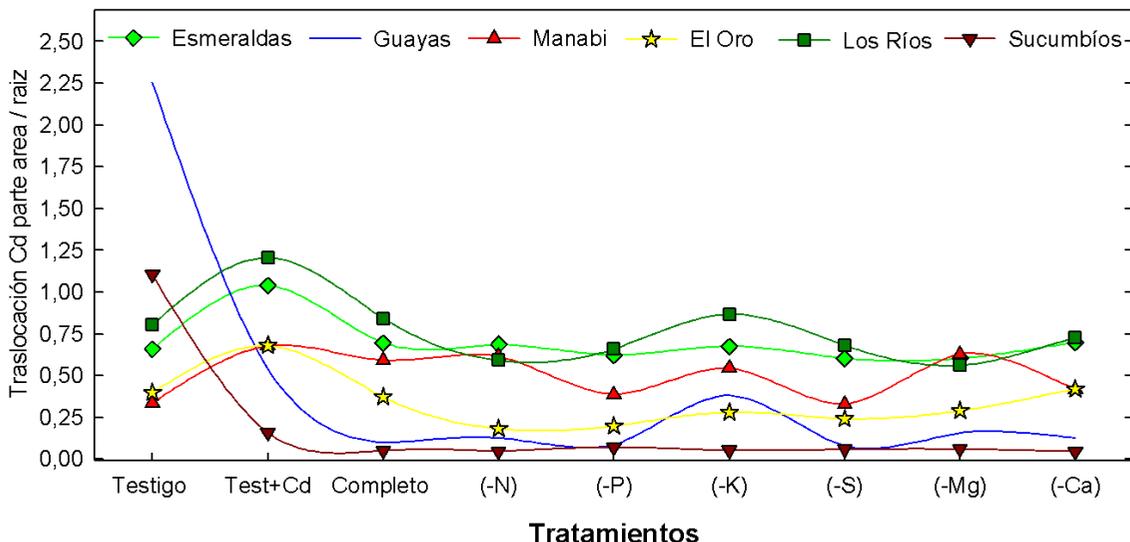


Figura 6. Efectos de la interacción entre la omisión de nutrientes y el tipo de suelo sobre la traslocación del Cd desde la raíz a la parte aérea en plántulas de arroz.

combinada con fertilizantes inorgánicos alcalinos y urea, puede ser una táctica prometedora y rentable para la remediación de suelos de arroz contaminados con Cd.

Qi et al. (2020) sugieren que las barreras apoplásticas reducen la translocación de Cd desde la raíz, lo que conduce a una menor acumulación en las partes superiores de las plantas de arroz. En el ensayo las barreras apoplásticas se depositaron más cerca de la punta de la raíz y fueron más gruesas en los cultivares de baja acumulación de Cd que en los de alta acumulación. Esta técnica tiene gran potencial para usarse como un indicador de detección para cultivares de arroz con baja acumulación de Cd, como complemento a la técnica de exclusión de nutrientes.

## Conclusiones

La aplicación completa de fertilizante aumenta la absorción de cadmio en todos los suelos evaluados, por lo que se considera necesaria aplicar la práctica de exclusión de nutrientes para reducir su concentración en raíces y en la parte aérea de las plantas de arroz y así garantizar la inocuidad de los alimentos.

Las omisiones de nutrientes que disminuyen la absorción de cadmio por las plantas son diferentes para cada suelo estudiado; fue eficiente la aplicación de esta técnica en los suelos de Manabí, El Oro y Guayas, pero no para los suelos de Esmeraldas y Sucumbíos, donde la exclusión de ningún elemento disminuyó la absorción de Cd.

El nitrógeno en todos los suelos de las provincias estudiadas presentó una relación de sinergismo con el Cd, pues disminuyó su absorción cuando fue omitido; similar situación fue observada cuando se limitó el P. Aunque este es un beneficio ambiental, ya que logra plantas de arroz libres de Cd, debe buscarse un equilibrio entre los rendimientos esperados para que garanticen un beneficio económico óptimo para los productores.

Para todos los suelos que cumplan con las características similares a los de Guayas, Manabí y El Oro se puede aplicar la técnica de exclusión de nutrientes para lograr la reducción de Cd en plantas de arroz, siempre y cuando las condiciones de pH a nivel del suelo y rizosfera sean alcalinas, lo que se puede alcanzar gracias a las condiciones edáficas de la zona o a través un manejo agronómico que conduzca al aumento del pH y, con ello, a la reducción de la absorción de cadmio.

## Referencias

- Alves, A. N.; Souza, F. G. D.; Chaves, L. H. G.; Sousa, J. A. D. y Vasconcelos, A. C. F. D. (2019). Effect of nutrient omission in the development of sunflower BRS-122 in greenhouse conditions. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 72(1), 8663-8671. <https://doi.org/10.15446/rfnam.v72n1.69388>
- Carrillo-González, R. y González-Chávez, M. C. (2015). Biosorción de zinc, cadmio y plomo con cápsulas de *Jatropha curcas*. *Revista Latinoamericana de Biotecnología Ambiental y Algal*, 6(2), 75-89. DOI <https://link.springer.com/content/pdf/10.7603/s40682-015-0006-1.pdf>
- Carrillo-Zenteno, M. D.; Fernandes, R. B. A.; Ferreira-Fontes, R. L. y Pereira-Jordão, C. (2022). Availability and chemical associations of cadmium in contaminated tropical soils amended with mineral and organic amendments. *Terra Latinoamericana*, 40, 1-12. e928. <https://doi.org/10.28940/terra.v40i0.928>
- Deng, X.; Chen, Y.; Yang, Y.; Lu, L.; Yuan, X.; Zeng, H. y Zeng, Q. (2020). Cadmium accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) alleviated by basal alkaline fertilizers followed by topdressing of manganese fertilizer. *Environmental Pollution*, 262, 114289. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114289>
- Di Rienzo, J. A.; Casanoves, F.; Balzarini, M. G., González, L.; Tablada, M. Robledo C. W. (2019). Centro de Transferencia InfoStat. Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. <http://www.infostat.com.ar>
- Fernandes, R. B. A.; Carrillo-Zenteno, M. D. y Ferreira-Fontes, M. P. (2012). *Avaliação do Método Neubauer para estudos do efeito de condicionadores do solo sobre a produção vegetal em solos contaminados com cádmio*. Maceió/Alagoas. Brasil.
- Furcal-Beriguete, P. y Torres-Morales, J. L. (2020). Determinación de concentraciones de cadmio en plantaciones de *Theobroma cacao* L. en Costa Rica. *Revista Tecnología en Marcha*, 33(1), 122-137. <http://dx.doi.org/10.18845/tm.v33i1.5027>
- Gardi, C.; Angelini, M.; Barceló, S.; Comerma, J.; Cruz Gaistardo, C.; Jones, A.; Krasilnikov, P.; Mendonça, M. L., Montanarella, L.; Muniz, O.; Schad, P.; Vara, M. I., y Vargas, R. (2014). *Atlas de suelos de América Latina y el Caribe*, Comisión Europea. Oficina de Publicaciones de la Unión Europea, L-2995, Luxembourg. <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/1001699/1/ATLASLAC.pdf>
- Hamid, Y.; Tang, L.; Wang, X.; Hussain, B.; Yaseen, M.; Aziz, M. Z. y Yang, X. (2018). Immobilization of cadmium and lead in contaminated paddy field using inorganic and organic additives. *Scientific Reports*, 8(1), 1-10. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-35881-8>
- Hasang, E. S.; Carrillo, M. D.; Durango, W. D. y Morales, F. L. (2018). Omisión de nutrientes: eficiencias de absorción, rendimiento y calidad de semilla en la formación de un híbrido de maíz. *Journal of Science and Research*, 3(11),45-50. <https://revistas.utb.edu.ec/index.php/sr/article/view/465>
- He, S.; He, Z.; Yang, X.; Stoffella, P. J. y Baligar, V. C. (2015). Soil biogeochemistry, plant physiology, and phytoremediation of cadmium-contaminated soils. *Advances in Agronomy*, 134, 135-225. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2015.06.005>
- Hidalgo-Moreno, C.; Báez-Pérez, A.; Parsa-Retana, M.; Etchevers-Barra, J.; Paz-Pellat, F. y Velázquez-Rodríguez, A. S. (2022). Formación de suelos a partir de tepetates: unidades estructurales, carbono orgánico y estabilidad estructural. *Terra Latinoamericana*, 40. <https://doi.org/10.28940/terra.v40i0.1447>
- Hou, D.; O'Connor, D.; Igalavithana, A. D.; Alessi, D. S.; Luo, J.; Tsang, D. C.; Sparks, D.; Yamauchi, Y.; Rinklebe, J. y Ok, Y. S. (2020). Metal contamination and bioremediation of agricultural soils for food safety and sustainability. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1(7), 366-381. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0061-y>
- Khalid, M. A.; James, B.; Chen, Y. H.; Saqib, H. S. A.; Li, H. H.; Jayasuriya, P. y Guo, W. (2018). Uptake, translocation, and accumulation of Cd and its interaction with mineral nutrients (Fe, Zn, Ni, Ca, Mg) in upland rice. *Chemosphere*, 215, 916-924. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.10.077>
- Khan, M. A.; Khan, S.; Khan, A. y Alam, M. (2017). Soil contamination with cadmium, consequences and remediation using organic amendments. *Science of the Total Environment*, 601, 1591-1605. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.06.030>
- Klein, V. (2008). *Física do solo*. Paso Fundo, Brasil: Editora Universitaria.
- Konkolewska, A.; Piechalak, A.; Ciszewska, L.; Antos-Krzemińska, N.; Skrzypczak, T.; Hanć, A. y Małecka, A. (2020). Combined use of companion planting and PGPR for the assisted phytoextraction of trace metals (Zn, Pb, Cd). *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 13809-13825. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-07885-3>
- Kubier, A.; Wilkin, R. T. y Pichler, T. (2019). Cadmium in soils and groundwater: A review. *Applied Geochemistry*, 108, 104388. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2019.104388>
- Li, X.; Teng, L.; Fu, T.; He, T. y Wu, P. (2021). Comparing the effects of calcium and magnesium ions on accumulation and translocation of cadmium in rice. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(27), 41628-41639. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-605441/v1>
- Li, Y.; Gao, C.; Rong, S.; Gu, J.; Zhao, H.; Su, S. y Liu, W. (2022). Combining mercapto functionalized palygorskite with zinc affect cadmium phytoavailability and soil microbial activity in rhizosphere soil. *Land Degradation y Development*, 33(1), 193-203. <https://doi.org/10.1002/ldr.4137>
- Liu, L.; Chen, H.; Cai, P.; Liang, W. y Huang, Q. (2009). Immobilization and phytotoxicity of Cd in contaminated soil amended with chicken manure compost. *Journal of Hazardous Materials*, 163(2-3), 563-567. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.07.004>

- Mahajan, P. y Kaushal, J. (2018). Role of phytoremediation in reducing cadmium toxicity in soil and water. *Journal of Toxicology*, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/4864365>
- Meng, L.; Huang, T.; Shi, J.; Chen, J.; Zhong, F.; Wu, L. y Xu, J. (2019). Decreasing cadmium uptake of rice (*Oryza sativa* L.) in the cadmium-contaminated paddy field through different cultivars coupling with appropriate soil amendments. *Journal of Soils and Sediments*, 19(4), 1788-1798. <https://doi.org/10.1007/s11368-018-2186-x>
- Meter, A.; Atkinson, R. J. y Laliberte, B. (2019). Cadmio en el cacao de América Latina y El Caribe. Análisis de la investigación y soluciones potenciales para la mitigación. *Bioersivity International*, Roma. <https://cgspace.cgiar.org/handle/10568/102354>
- Muyulema-Allaica, J. C.; Canga-Castillo, S. M.; Pucha-Medina, P. M. y Espinosa-Ruiz, C. G. (2019). Evaluación de la contaminación por metales pesados en suelos de la Reserva Ecológica de Manglares Cayapas Mataje (REMACAM)-Ecuador. RIIIT. *Revista internacional de investigación e innovación tecnológica*, 7(41), 40-61. [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-97532019000600003&script=sci\\_arttext](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-97532019000600003&script=sci_arttext)
- Nasraoui-Hajaji, A.; Gouia, H.; Carrayol, E. y Haouari-Chaffei, C. (2012). Ammonium alleviates redox state in solanum seedlings under cadmium stress conditions. *Journal of Environmental & Analytical Toxicology*, 2, 116-120. <http://dx.doi.org/10.4172/2161-0525.1000141>
- Ochoa, M.; Tierra, W.; Tupuna-Yerovi, D. S.; Guanoluiza, D.; Otero, X. L. y Ruales, J. (2020). Assessment of cadmium and lead contamination in rice farming soils and rice (*Oryza sativa* L.) from Guayas province in Ecuador. *Environmental Pollution*, 260, 114050. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114050>
- Pilco, Y. J. C. y García, D. E. (2020). Determinación de cadmio en suelos agrícolas del cantón Pallatanga, provincia de Chimborazo, Ecuador. *Revista Científica Ciencias Naturales y Ambientales*, 14(1). <https://www.revistas.ug.edu.ec/index.php/cna/article/download/1288/1323>
- Qi, X.; Tam, N. F. Y.; Li, W. C. y Ye, Z. (2020). The role of root apoplastic barriers in cadmium translocation and accumulation in cultivars of rice (*Oryza sativa* L.) with different Cd-accumulating characteristics. *Environmental Pollution*, 264, 114736. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114736>
- Qiu, G.; Zhu, M.; Meng, J.; Luo, Y.; Di, H.; Xu, J. y Brookes, P. C. (2019). Changes in soil microbial biomass C, ATP and microbial ATP concentrations due to increasing soil Cd levels in Chinese paddy soils growing rice (*Oryza sativa*). *Plant and Soil*, 436(1), 1-12. <https://doi.org/10.1007/s11104-018-03899-6>
- Quezada, C. J.; Carrillo, M. D.; Morales, F. L. y Carrillo, R. A. (2017). Nutrient critical levels and availability in soils cultivated with peach palm (*Bactris gasipaes* Kunth.) in Santo Domingo de Los Tsáchilas, Ecuador. *Acta Agronómica*, 66(2) <http://dx.doi.org/10.15446/acag.v66n2.55026>
- Rahman, Z. y Singh, V. P. (2019). The relative impact of toxic heavy metals (THMs) arsenic (As), cadmium (Cd), chromium (Cr)(VI), mercury (Hg), and lead (Pb) on the total environment: An overview. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191(7), 1-21. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7528-7>
- Romero-Estévez, D.; Yáñez-Jácome, G. S. y Navarrete, H. (2022). Non-essential metal contamination in Ecuadorian agricultural production: A critical review. *Journal of Food Composition and Analysis*, 104932. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2022.104932>
- Rosales-Huamani, J.; Centeno-Rojas, L.; Cajacuri-Pérez, J.; Luis-Breña, J. y Chávez-Chapana, C. (2021). Identificación de cadmio y plomo en los cultivos de cacao ubicados en la zona de Satipo - Junín. *Revista Tecnica*, 31(2). <https://doi.org/10.21754/tecnia.v21i2.1062>
- Sadeghipour, O. (2018). Enhancing cadmium tolerance in common bean plants by potassium application. *The Philippine Agricultural Scientist*, 101(2), 167-175. <https://pas.cafs.uplb.edu.ph/download/enhancing-cadmium-tolerance-in-common-bean-plants-by-potassium-application/>
- Sakpirom, J.; Kantachote, D.; Siripattanakul-Ratpukdi, S.; McEvoy, J. y Khan, E. (2019). Simultaneous bioprecipitation of cadmium to cadmium sulfide nanoparticles and nitrogen fixation by *Rhodospseudomonas palustris* TN110. *Chemosphere*, 223, 455-464. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.02.051>
- Shen, B.; Wang, X.; Zhang, Y.; Zhang, M.; Wang, K.; Xie, P. y Ji, H. (2019). The optimum pH and Eh for simultaneously minimizing bioavailable cadmium and arsenic contents in soils under the organic fertilizer application. *Science of the Total Environment*, 711, 135229. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135229>
- Soto-Benavente, M.; Rodríguez-Achata, L.; Olivera, M.; Arostegui-Sánchez, V.; Colina-Nano, C. y Garate-Quispe, J. (2020). Riesgos para la salud por metales pesados en productos agrícolas cultivados en áreas abandonadas por la minería aurífera en la Amazonía peruana. *Scientia Agropecuaria*, 11(1), 49-59. <http://dx.doi.org/10.17268/sci.agropecu.2020.01.06>
- Sterckeman, T. y Thomine, S. (2020). Mechanisms of cadmium accumulation in plants. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 39(4), 322-359. <https://doi.org/10.1080/07352689.2020.1792179>
- Tsai, K. F.; Hsu, P. C.; Lee, C. T.; Kung, C. T.; Chang, Y. C.; Fu, L. M., Ou, Y. C.; Lan, K. C.; Yen, T. H. y Lee, W. C. (2021). Association between enzyme-linked immunosorbent assay-measured kidney injury markers and urinary cadmium levels in chronic kidney disease. *Journal of Clinical Medicine*, 11(1), 156. <https://doi.org/10.3390/jcm11010156>
- Ulloa, M. C. y Valle, L. (2021). Índice de cosecha con macronutrientes en grano de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd). *Alfa Revista de Investigación en Ciencias Agronómicas y Veterinaria*, 5(13), 15-28. <https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v5i13.95>
- Wan, Y.; Huang, Q.; Camara, A. Y.; Wang, Q. y Li, H. (2019). Water management impacts on the solubility of Cd, Pb, As, and Cr and their uptake by rice in two contaminated paddy soils. *Chemosphere*, 228, 360-369. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.04.133>
- Yu, Y.; Wan, Y.; Camara, A. Y. y Li, H. (2018). Effects of the addition and aging of humic acid-based amendments on the solubility of Cd in soil solution and its accumulation in rice. *Chemosphere*, 196, 303-310. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.01.002>