



Efecto de omisión de macronutrientes sobre absorción de cadmio en plántulas de arroz*

Effect of macronutrient omission on cadmium uptake in rice seedlings

Manuel Danilo Carrillo Zenteno^{1,2}, Juan Xavier Valarezo¹, Karina Peña Salazar¹, Wuellins Durango¹, Yelitza García-Orellana^{1,3}

* Recepción: 25 de julio, 2023. Aceptación: 18 de octubre, 2023. Este trabajo formó parte de una investigación de la carrera de Ingeniería Ambiental en la UTE, sede Santo Domingo y de una línea de investigación del Departamento de Suelos y Agua, Estación Experimental Tropical Pichilingue del Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP) de Ecuador.

¹ Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP), Estación Experimental Tropical Pichilingue, Departamento de Suelos y Agua. Código Postal 120313, Mocache, Los Ríos, Ecuador. juan9xavier1995@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0001-5426-2012>); karina.pena@iniap.gob.ec (<https://orcid.org/0000-0002-6540-1935>); wuellins.durango@iniap.gob.ec (<https://orcid.org/0000-0002-4683-5316>).

² Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Av. Carlos J. Arosemena 38, Quevedo, Los Ríos, Ecuador. manuel.carrillo@iniap.gob.ec (<https://orcid.org/0000-0001-7062-8248>).

³ Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado (UCLA), Departamento de Ingeniería Agrícola. Código postal 3001, Barquisimeto, Venezuela. yelitzagarcia@ucla.edu.ve (autor para correspondencia; <https://orcid.org/0000-0001-9973-9080>).

Resumen

Introducción. Las condiciones edafoclimáticas del Ecuador son ideales para el cultivo del arroz, los rendimientos son mayores al promedio mundial, pero su manejo agronómico conlleva a un aumento de cadmio en el suelo, que puede llegar al grano por translocación, lo cual afecta su inocuidad. **Objetivo.** Evaluar la absorción de cadmio mediante la técnica de omisión de macronutrientes en seis suelos del Ecuador y su efecto sobre el desarrollo vegetativo del cultivo de arroz. **Materiales y métodos.** El ensayo se realizó en la Estación Experimental Tropical Pichilingue del Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias, Ecuador, durante el año 2018. Se estudiaron nueve tratamientos 1) Sin fertilización y sin Cd (testigo 1), 2) sin fertilización y con Cd (Testigo 2), 3) Fertilización completa y seis tratamientos de omisión de un nutriente a la vez, se usó un diseño de experimentos de bloques completamente al azar, parcelas divididas y tres repeticiones. Las variables evaluadas fueron las relacionadas a la producción de materia seca en raíz y parte aérea. Para la comparación entre medias, se utilizó la prueba de Tukey ($p < 0,05$). **Resultados.** Las omisiones de los nutrientes (N y P) llevaron a la reducción de la absorción del Cd, que disminuyó la producción de materia seca, en particular en los suelos muy ácidos o alcalinos como en Sucumbíos (pH 4) y Guayas (pH 7,9), respectivamente. **Conclusiones.** La absorción de cadmio en plantas de arroz se redujo en mayor medida con la omisión de los macronutrientes N y P, principalmente en los suelos de Sucumbíos, Los Ríos, El Oro y Manabí, afectando también la omisión de nutrientes a la producción de materia seca y los rendimientos, observándose además que un pH por debajo de 5 o superior a 7,9 afecta la absorción de cadmio en los suelos estudiados

Palabras claves: fertilidad, inocuidad, metales pesados, nutrición, sostenibilidad.



Abstract

Introduction. The soil and climatic conditions of Ecuador are ideal for rice cultivation, yields are higher than the world average, but agronomic management leads to an increase of cadmium in the soil, which can reach the grain by translocation, which affects its safety. **Objective.** To evaluate the absorption of cadmium through the omission of macronutrients technique in six soils of Ecuador and its effect on the vegetative development of rice crops. **Materials and methods.** The trial was carried out at the Pichilingue Tropical Experimental Station of the National Institute of Agricultural Research, Ecuador, during 2018. Nine treatments were studied: 1) Without fertilization and without Cd (control 1), 2) without fertilization and with Cd (Control 2), 3) Complete fertilization and six omission treatments of one nutrient at a time, a completely randomized block design of experiments, divided plots and three repetitions was used. The variables evaluated were those related to the production of dry matter in the root and aerial part. For the comparison between means, the Tukey test was used ($p < 0.05$). **Results.** Nutrients omissions (N and P) led to reduced Cd absorption, which decreased dry matter production, particularly in very acidic or alkaline soils such as in Sucumbíos (pH 4) and Guayas (pH 7, 9), respectively. **Conclusions.** The absorption of cadmium in rice plants was reduced to a greater extent with the omission of the macronutrients N and P, mainly in the soils of Sucumbíos, Los Ríos, El Oro and Manabí, the nutrient omission technique also affecting the production of dry matter and yields, also observing that a pH below 5 or higher than 7.9 affects the absorption of cadmium in the soils studied.

Keywords: fertility, heavy metals, nutrition, safety, sustainability.

Introducción

El cadmio (Cd) es un metal pesado tóxico que supone un riesgo para la salud de los seres humanos y los animales. Su exposición sucede a través de alimentos y aguas contaminados. Los datos epidemiológicos sugieren que la exposición laboral y ambiental al Cd puede estar relacionada con varios tipos de cáncer (Genchi et al., 2020). Por lo cual, es necesario depurar los suelos contaminados para proporcionar alimentos seguros. Una tecnología de bajo costo que puede aplicarse en suelos con niveles elevados de Cd es la fitorremediación, técnica que se basa en el hecho de que las plantas tienen la capacidad de extraer y acumular metales pesados (Hidayati & Rini, 2020).

El arroz (*Oryza sativa* L.) es uno de los principales candidatos para la fitorremediación debido a su alta producción de biomasa y por acumular Cd a niveles moderados en sus brotes (Ibaraki et al., 2009). En los suelos, la biodisponibilidad de los metales en el perfil depende de factores como las características físicas, químicas y biológicas del mismo, dado que influyen sobre la actividad y concentración de los metales en la solución del suelo (Sánchez et al., 2011).

Debido a que existen problemas de contaminación de Cd en un importante número de suelos agrícolas, que incluyen las áreas cultivadas con arroz, se han realizado diversos estudios donde se aplica la técnica del elemento faltante (Alves et al., 2019; Hasang Morán et al., 2018), con el objetivo de conocer la consecuencia de no aplicar un elemento sobre el rendimiento de los cultivos y sobre la absorción de Cd por parte de las plantas, esta práctica se lleva a cabo considerando que es necesario garantizar la disponibilidad de nutrientes para lograr rendimientos óptimos, pero siempre dentro de un enfoque de desarrollo sostenible.

La fertilización se ha orientado a mejorar el rendimiento del cultivo, sin embargo, es necesario considerar que los nutrientes tienen diferentes relaciones entre sí y con los elementos tóxicos del suelo. El nitrógeno (N) aplicado en cantidades necesarias para cubrir los requerimientos del cultivo, mejora la resistencia a los efectos tóxicos del Cd (Khan et al., 2015), y provoca una menor absorción de Cd. Se ha determinado también que cuando el N es aplicado como sulfato de amonio ((NH_4)₂SO₄) disminuye los efectos tóxicos del Cd si se compara con la aplicación

de nitrato de calcio ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$) y nitrato de amonio (NH_4NO_3), esto indica un efecto antagónico del Cd con amonio y sinérgico con el nitrato (Nasraoui-Hajaji et al., 2012). Además del nitrógeno, el fósforo (P) puede provocar disminución de la disponibilidad del Cd en el suelo cuando se aplica como roca fosfórica, formando fosfatos de cadmio (González-Fuentes et al., 2020). Sin embargo, también podría incrementar su absorción al usar fuentes de P con elevados contenidos de Cd (Martínez Madrid & Marrugo-Negrete, 2021), mientras que el azufre (S) al igual que el N, minimiza los impactos del Cd en las plantas, ayuda a su crecimiento, productividad y, en dosis bajas, disminuye el contenido de Cd en tejidos foliares (Zaid et al., 2019). La asimilación del potasio (K) es afectada por la presencia de Cd en el suelo, que interfiere en la absorción y transporte de este nutriente (Wu et al., 2021).

Otro de los nutrientes cuya dinámica en el suelo está asociada a la reducción del contenido de Cd es el magnesio (Mg). La aplicación de Mg disminuyó significativamente las concentraciones de Cd disponibles en el suelo (Li et al., 2017). También se redujo significativamente el contenido de Cd en los tejidos del arroz con la aplicación de hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) (Zeng et al., 2020), en ambos trabajos se redujo el riesgo de acumulación de Cd en suelos contaminados bajo condiciones de inundación, lo que garantiza la inocuidad de los granos de arroz, como lo exigen los estándares internacionales; por lo tanto, el objetivo de este estudio fue evaluar la absorción de cadmio mediante la técnica de omisión de macronutrientes en seis suelos del Ecuador y su efecto sobre el desarrollo vegetativo del cultivo.

Materiales y métodos

Descripción de área de estudio

El estudio 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), durante el segundo semestre del año 2018, ubicada el cantón Mocache, provincia de Los Ríos, Ecuador ($01^\circ 06'$ latitud sur y $79^\circ 28'$ longitud oeste) con altitud de 120 m s. n. m.

Suelos a estudiar

Los suelos para el estudio fueron extraídos de cacaoteras de seis provincias (Esmeraldas, Manabí, Guayas, El Oro, Los Ríos y Sucumbíos), se colectaron de los primeros 0,10 m superficiales de suelo mineral. Para el análisis de textura, se utilizó el método de Boyoucos (Klein, 2008) y para los químicos los utilizados por Quezada-Crespo et al. (2017). La relación utilizada de suelo: agua fue de 1:2,5 para el pH. La materia orgánica se analizó con el método de Walkley-Black (Yarce & Castillo, 2014), P por colorimetría, Cd con agua regia (HNO_3 y HCl concentrado, proporción 3:1) modificado por Bacon y Hudson (2001) y usado por Carrillo (2003); el S con fosfato de calcio monobásico, y para S y cationes, se cuantificaron por absorción atómica con la solución extractante de Olsen modificada. Los resultados se observan en el Cuadro 1.

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 NPKSMgCa y seis de omisión de nutrientes), cuyo arreglo fue el resultado de la combinación de los factores en estudio (Cuadro 2), dando un total de 54 tratamientos, todos instalados con tres repeticiones para un total de 162 unidades experimentales.

Cuadro 1. Características químicas, físicas y clasificación de seis suelos tropicales del Ecuador, 2018.

Table 1. Chemical and physical characteristics and classification of six tropical soils of Ecuador, 2018.

Provincia	Clasificación taxonómica ¹	pH	P	S	Cd	K	Ca	Mg	MO	Arena	Arcilla	Limo	Clase textural
			mg kg ⁻¹			meq 100 mL ⁻¹				dag kg ⁻¹			
Esmeraldas	Cambisol dístico	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

¹Gardi et al. (2014). A: arcilloso, FA: franco arcilloso; FL: franco limoso; F: franco. / ¹Gardi et al. (2014). A: clayey; FA: clay loam; FL: silty loam; F: loam.

Cuadro 2. Tratamientos evaluados para determinar la biodisponibilidad de Cd en suelos tropicales del Ecuador por efecto de la omisión de nutrientes, Ecuador, 2018.

Table 2. Treatments evaluated to determine the Cd bioavailability tropical soils of Ecuador due to the effect of nutrient omission, Ecuador, 2018.

Suelo *	Fertilización	Suelo *	Fertilización	Suelo **	Fertilización	Suelo *	Fertilización	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. / *Soil 1: Esmeraldas; 2: Guayas; 3: Manabí; 4: Los Ríos; 5: El Oro; 6: Sucumbíos.

Adición del cadmio al suelo

Para asegurar la disponibilidad de Cd, se adicionó 3 mg kg⁻¹ de Cd, se usó cloruro de cadmio (CdCl₂). Se utilizaron fundas plásticas transparentes y gruesas (0,20 x 0,38 m), donde se colocó 1 kg de cada suelo y añadió 10 mL de una solución de 3 mg kg⁻¹ de Cd, luego se humedeció con agua desionizada (sistema Barnstead E-pure) hasta capacidad de campo. En estas condiciones se mantuvo por un mes y finalizada la incubación, los suelos fueron secados a temperatura ambiente en invernadero, molido en mortero de cerámica, pasadas por tamiz de 2 mm y pesado 100 g de suelo en recipientes de 100 cm³ de capacidad (vaso), cada tratamiento fue identificado.

Biodisponibilidad de Cd

Para conocer la biodisponibilidad del Cd, se utilizó el método de Neubauer (Fernandes et al., 2012), veinticinco semillas pre germinadas de arroz (*Oryza sativa*) de la variedad INIAP-12 fueron trasplantadas. La pre germinación consistió en colocar por un día semillas de arroz sobre papel absorbente humedecido con agua ultra pura, después por dos días tapadas con funda plástica negra, tiempo en que se observó la emisión de la radícula.

Preparación de tratamientos

Las soluciones nutritivas para aplicar los tratamientos de omisión de elementos se prepararon mediante el uso de 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 , $CaHO_4P$ y K_2SO_4 , y el testigo consistió en agua ultra pura. Para la aplicación de los tratamientos de omisión de elementos, se prepararon catorce soluciones nutritivas, dos por tratamiento y otra solo con agua ultra pura, que correspondió al tratamiento testigo. Estas soluciones, se aplicaron junto con el agua de riego a los 10, 20 y 30 días después del trasplante (DDT), y se fraccionó en tres aplicaciones para N, K, Mg y Ca y dos aplicaciones para P y S (10 y 30 DDT).

La humedad del suelo se mantuvo cercana a la capacidad de campo, mediante riegos diarios con agua ultra pura. Para asegurar el contenido de materia seca, a los 35 DDT se aplicó una solución de nitrato de amonio $NH_4(NO_3)$ en dosis de 50 mg kg^{-1} de N, excepto de los tratamientos testigos (con y sin Cd) y el de omisión de nitrógeno.

Variables y métodos de evaluación

Transcurridos 40 DDT, se suspendió el riego y se procedió a la colecta, por separado, del suelo externo a las raíces y el adherido a las mismas (rizósfera). Para determinar la materia seca, se seccionó en la planta la parte aérea y raíz, lavadas con agua corriente y luego con agua destilada y agua ultra pura. Se colocaron en fundas de papel previamente identificadas, llevadas a estufa por 72 h a $70^\circ C$, posteriormente, se colocaron en desecador y una vez enfriadas, se pesaron en una balanza analítica, los resultados se expresaron en g vaso^{-1} de materia seca.

Los tejidos secos de la variable anterior, fueron molidos en molino tipo Willey, que tiene aspas de acero y fueron limpiados minuciosamente después de cada molienda con toallas humedecidas con agua ultrapura. Posteriormente, fueron llevados a digerir en laboratorio aplicando la metodología de mineralización nítrico-perclórica (relación 4:1). Se colocaron 0,5 g de tejido en un Beaker de 100 mL, seguidamente se adicionó una mezcla de HNO_3 (8 mL) + $HClO_4$ (2 mL). Después de una hora se puso la mezcla en una placa calentadora a $180^\circ C$, por un tiempo de 90 min hasta la digestión total, el extracto se filtró en balón de 10 mL y llevado a volumen con agua ultra pura, expresando los resultados en mg kg^{-1} . Todas las lecturas de Cd, se realizaron en un espectrofotómetro de absorción atómica Perkin Elmer Analyst 400, acoplado con horno de grafito HGA 900, trabajando con óxido nitroso y en longitud de onda de 228,8 nm.

Análisis estadístico

Los tratamientos estuvieron dispuestos en el invernadero, ordenados en un esquema de diseño de bloques completos al azar, bajo parcelas divididas, donde la parcela grande correspondió a los suelos y las pequeñas a los tratamientos de omisión de nutrientes, se trabajó con tres repeticiones. Una vez que se obtuvieron los datos se verificó que cumplieran los supuestos de normalidad y se realizó una comparación entre medias con la prueba de Tukey ($p < 0,05$). Los análisis se realizaron mediante el empleo del programa estadístico InfoStat versión 2020 (Di Rienzo et al., 2020).

Resultados

Omisión de nutrientes sobre la concentración de Cd en parte aérea de plántulas de arroz

El análisis de varianza de la concentración de Cd en la parte aérea de las plántulas de arroz determinó diferencias estadísticas significativas ($P < 0,05$) en los suelos de Esmeraldas, Guayas, Manabí y Sucumbíos por la omisión de nutrientes.

En el Cuadro 3 se puede observar que la aplicación de una fertilización completa (NPKSMgCa) no provocó un incremento en la concentración de Cd en la parte aérea. Con la omisión de nitrógeno (N) se redujo la concentración de Cd en la parte aérea del arroz en los suelos evaluados exceptuando el suelo de Sucumbíos donde los valores permanecen iguales al del tratamiento testigo +Cd. Sobre la omisión de Ca sobre la concentración de Cd en la parte aérea, hubo una disminución del $0,098 \text{ mg kg}^{-1}$ en los suelos de Esmeraldas.

Cuadro 3. Concentración de cadmio (Cd) promedio (mg/kg) en la parte aérea de plántulas de arroz (*Oryza sativa*), según tratamientos con omisión de nutrientes y testigos. Ecuador, 2018.

Table 3. Average cadmium (Cd) concentration (mg/kg) in the aerial part of rice (*Oryza sativa*) seedlings, according to treatments with nutrient omission and controls. Ecuador, 2018.

OMI	Esmeraldas	Guayas	Manabí	El Oro	Los Ríos	Sucumbíos
Testigo	0,0113 b	0,0070 b	0,0050 b	0,0083 ns	0,0007 ns	0,0067 c
Test+Cd	0,3247 a	0,0120 ab	0,0390 a	0,0220 ns	0,0280 ns	0,0780 a
Completo	0,2620 a	0,0107 ab	0,0267 a	0,0120 ns	0,0313 ns	0,0683 b
(-N)	0,2744 a	0,0113 ab	0,0340 a	0,0193 ns	0,0253 ns	0,0780 b
(-P)	0,2163 a	0,0150 ab	0,0327 a	0,0203 ns	0,0417 ns	0,0897 b
(-K)	0,2740 a	0,0263 a	0,0383 a	0,0213 ns	0,0433 ns	0,0757 b
(-S)	0,2947 a	0,0187 ab	0,0377 a	0,0227 ns	0,0343 ns	0,0847 b
(-Mg)	0,3010 a	0,0177 ab	0,0360 a	0,0267 ns	0,0420 ns	0,0727 b
(-Ca)	0,2267 a	0,0223 ab	0,0317 a	0,0237 ns	0,0693 ns	0,1217 b

Los promedios con igual letra en columna no son diferentes significativamente según la prueba estadística de medias de Tukey ($P < 0,05$), ns: no significativo. / Averages with the same letter in the column are not significantly different according to Tukey's statistical test of means ($P < 0,05$), ns: not significant.

Con respecto a los suelos de Esmeraldas no existieron diferencias significativas entre los tratamientos y el testigo + Cd ($P < 0,05$), aún con la reducción de las concentraciones de Cd en la parte aérea en todos los tratamientos aplicados, hubo la menor concentración cuando se omitió el Ca ($0,098 \text{ mg kg}^{-1}$). Este mismo comportamiento se evidencia en los suelos de Manabí, pero en este caso la fertilización completa es quien presentó menor concentración de Cd en la parte aérea con respecto al testigo+Cd ($0,012 \text{ mg kg}^{-1}$). En el suelo del Guayas no hubo diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos ($P < 0,05$) si se compara con el testigo+Cd, se observa que se produjo un incremento en la concentración de Cd en la parte aérea de las plántulas cuando el elemento omitido es el K ($0,014 \text{ mg kg}^{-1}$). En los suelos de Sucumbíos hubo diferencias significativas entre el testigo+Cd y el resto de los tratamientos, con un mayor incremento en la concentración de Cd en la parte aérea de las plántulas cuando el elemento omitido fue el S ($0,007 \text{ mg kg}^{-1}$) (Cuadro 3).

Omisión de nutrientes sobre la concentración de Cd en raíces de plántulas de arroz

El análisis de varianza de la concentración de Cd en las raíces de las plántulas de arroz determinó diferencias estadísticas significativas ($P < 0,05$) en todos los suelos evaluados por la omisión de nutrientes. Los mayores valores de Cd presentes en la raíz, se encontraron en los suelos de Sucumbíos (1,14 hasta 1,38 mg kg^{-1}), seguido de Esmeraldas (0,32 hasta 0,74 mg kg^{-1}) y Los Ríos (0,34 hasta 0,51 mg kg^{-1}), los restantes suelos mostraron valores menores a 0,30 mg kg^{-1} (Cuadro 4).

Cuadro 4. Concentración de cadmio (Cd) promedio (mg/kg) en la raíz de plántulas de arroz (*Oryza sativa*), según tratamientos con omisión de nutrientes y testigos. Ecuador, 2018.

Table 4. Average cadmium (Cd) concentration (mg/kg) in the root of rice (*Oryza sativa*), according to treatments with nutrient omission and control. Ecuador, 2018.

Tratamiento	Esmeraldas	Guayas	Manabí	El Oro	Los Ríos	Sucumbíos
Testigo	0,0293 d	0,0043 c	0,0393 d	0,0527 c	0,0363 c	0,0067 b
Test+Cd	0,7440 c	0,2210 bc	0,2460 cd	0,1690 bc	0,4350 b	1,3800 a
Completo	0,6470 a	0,1810 ab	0,1820 a	0,1663 ab	0,4477 a	1,2833 a
(-N)	0,6404 ab	0,2467 ab	0,2981 ab	0,1760 ab	0,4967 ab	1,3167 a
(-P)	0,5433 b	0,2180 ab	0,2440 a	0,1923 a	0,4654 ab	1,2467 a
(-K)	0,7037 ab	0,1577 ab	0,2160 ab	0,1670 ab	0,4670 ab	1,3133 a
(-S)	0,6493 ab	0,1939 a	0,2010 a	0,1703 ab	0,4284 a	1,2933 a
(-Mg)	0,7170 ab	0,2033 ab	0,2287 ab	0,1420 ab	0,5090 ab	1,2533 a
(-Ca)	0,3197 ab	0,1067 ab	0,1193 ab	0,1050 ab	0,3393 b	1,1400 a

Los promedios con igual letra en columna no son diferentes significativamente según la prueba estadística de medias de Tukey ($P < 0,05$). / Averages with the same letter in the column are not significantly different according to Tukey's statistical test of means ($P < 0,05$).

En todos los suelos se evidenció que con la aplicación de fertilizantes se estimuló la absorción del Cd hasta las raíces y al comparar la concentración del metal pesado en las raíces de los tratamientos de fertilización completa con los de omisión, solo en el suelo de Esmeraldas hubo un incremento de 0,013 mg kg^{-1} , con respecto al tratamiento testigo. La omisión de N provocó una disminución en la concentración de Cd en las raíces en los suelos de Esmeraldas y Sucumbíos de 0,104 y 0,063 mg kg^{-1} respectivamente, además, la omisión del K provocó un incremento del Cd en la raíz sólo en el suelo de Los Ríos (0,03 mg kg^{-1}), en cambio redujo la concentración en el resto de las provincias. La omisión de P y S, provocó un incremento de 0,023 y 0,001 mg kg^{-1} respectivamente, en la concentración del Cd en la raíz del arroz creciendo en el suelo de El Oro.

En la provincia de Los Ríos la omisión de K y Mg provocó una disminución en el contenido de Cd en las raíces con respecto al tratamiento testigo + Cd de 0,03 y 0,07 mg kg^{-1} , respectivamente (Cuadro 4).

Materia seca de las plántulas de arroz por tipo de suelo

La menor producción de materia seca fue observada en los suelos de Sucumbíos como se muestra en la Figura 1A, que corresponde a un suelo ácido, con pH 4. En el resto de los suelos evaluados la producción de materia seca no fue afectada a excepción de los suelos de Guayas, con valores de pH por encima de 7,9, donde el valor de materia seca fue de 1,27 g vaso^{-1} , que fueron significativamente inferiores ($P < 0,05$) a los observados en el resto de los tratamientos. Contrario a lo observado en la producción de la parte aérea, en las raíces se presentó un menor desarrollo radical en los suelos del Guayas, Manabí y El Oro (Figura 1B) con valores de 0,73, 0,62 y 0,69 g vaso^{-1} , respectivamente, mientras

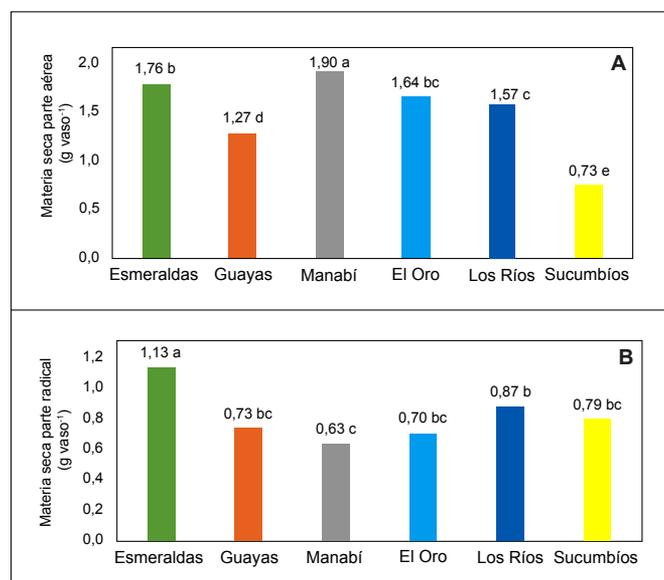


Figura 1. Efecto que produce el tipo de suelo con presencia de Cd sobre la producción de materia seca de plántulas de arroz (*Oryza sativa*). Ecuador 2018.

Letras diferentes en la misma fila denotan diferencias estadísticas según la prueba de Tukey (P<0,05).

Figure 1. Effect of soil type with presence of Cd on dry matter production of rice (*Oryza sativa*) seedlings, Ecuador 2018.

Different letters in the same row denote statistical differences according to Tukey's test (P<0,05).

que en los suelos ácidos con pH de 4 como los reportados en Sucumbíos el valor de materia seca en la parte radical fue de 0,79 g vaso⁻¹.

Materia seca de las plántulas de arroz en función del nutriente omitido

Además del tipo de suelo, la producción de materia seca aérea (MSA) de las plántulas de arroz fue afectada por el nutriente que fue omitido, como se observa en la Figura 2A; así, el valor más bajo de materia seca se obtuvo en el testigo contaminado con Cd y cuando fue excluido el nitrógeno con un valor de 1,32 y 1,42 g vaso⁻¹, respectivamente, aunque son estadísticamente iguales (P<0,05); mientras que los mayores valores se alcanzaron con la omisión de K (1,55 g vaso⁻¹), aunque en el caso de la omisión de nutrientes sobre la producción de materia seca radical (MSR), el comportamiento es similar a la MSA (Figura 2B), la menor producción de materia seca se observó en el testigo contaminado con Cd con 0,60 g vaso⁻¹ y donde se omitió N con 0,73 g vaso⁻¹, siendo estadísticamente similares (P<0,05), mientras que el mayor desarrollo radical se encontró cuando fue omitido el P (0,92 g vaso⁻¹).

Interacción entre la omisión de nutrientes y el tipo de suelo sobre materia seca en parte aérea de plántulas de arroz

Una vez evaluados los efectos individuales del tipo de suelo y el tratamiento de fertilización sobre la producción de materia seca de la parte aérea y raíces de las plantas, se valoró el efecto de la interacción entre la omisión de nutrientes y tipos de suelos sobre la producción de materia seca en la parte aérea, cuyos resultados se observan en el Cuadro 5, donde se encuentra que, en general, la mayor producción de materia seca de la parte aérea se obtuvo en suelos de Manabí (2,00 g vaso⁻¹), seguido por Esmeraldas (1,89 g vaso⁻¹), siendo la más baja la mostrada por

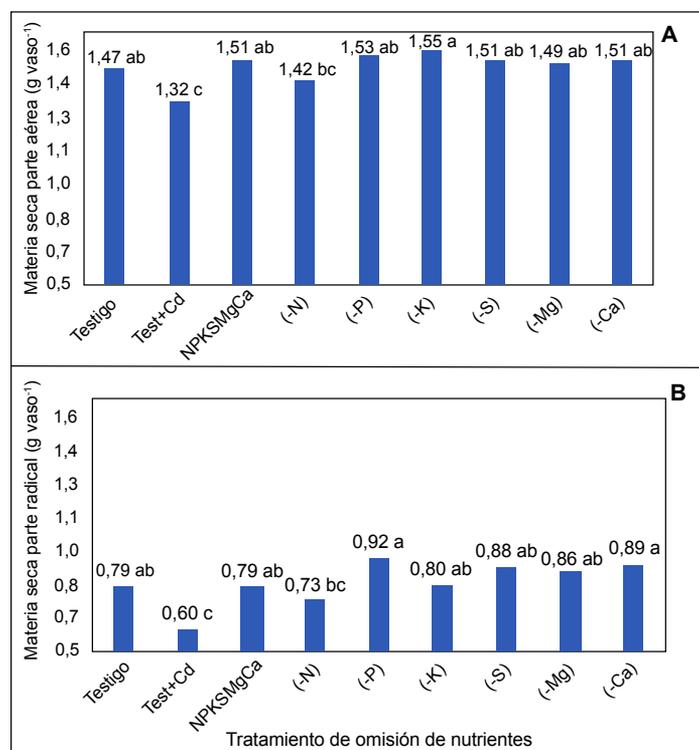


Figura 2. Efecto de la omisión de nutrientes en suelos en presencia de Cd sobre la producción de materia seca en plántulas de arroz (*Oryza sativa*). Ecuador, 2018.

Letras diferentes en la misma fila denotan diferencias estadísticas según la prueba de Tukey ($P < 0,05$).

Figure 2. Effect of nutrient omission in soils in the presence of Cd on dry matter production in rice (*Oryza sativa*) seedlings, Ecuador, 2018.

Different letters in the same row denote statistical differences according to Tukey's test ($P < 0,05$).

Cuadro 5. Efecto de interacción entre la omisión de nutrientes y el tipo de suelo sobre la producción materia seca promedio en parte aérea de plántulas de (*Oryza sativa*). Ecuador, 2018.

Table 5. Interaction effect between nutrient omission and soil type on average dry matter production in aerial part of rice (*Oryza sativa*) seedlings, Ecuador, 2018.

Tratamiento	Esmeraldas	Guayas	Manabí	El Oro	Los Ríos	Sucumbíos
Testigo	1,892 ns	1,152 b	2,004 a	1,553 ns	1,491 ns	0,707 abc
Test+Cd	1,625 ns	1,228 ab	1,529 b	1,501 ns	1,412 ns	0,652 c
Completo	1,704 ns	1,293 ab	1,917 ab	1,692 ns	1,655 ns	0,788 a
(-N)	1,767 ns	1,245 ab	1,819 a	1,564 ns	1,484 ns	0,662 bc
(-P)	1,842 ns	1,259 ab	1,996 a	1,723 ns	1,590 ns	0,778 a
(-K)	1,752 ns	1,442 a	1,954 a	1,758ns	1,633 ns	0,762 ab
(-S)	1,697 ns	1,307 ab	1,973 a	1,712 ns	1,554 ns	0,805 a
(-Mg)	1,669 ns	1,207 ab	1,953 a	1,668 ns	1,687 ns	0,729 abc
(-Ca)	1,854 ns	1,313 ab	1,968 a	1,603 ns	1,623 ns	0,706 abc

Los promedios con igual letra en columna no son diferentes significativamente según la prueba estadística de medias de Tukey ($P < 0,05$). / Averages with the same letter in the column are not significantly different according to Tukey's statistical test of means ($P < 0,05$).

el suelo de Sucumbíos que alcanzó 0,71 g vaso⁻¹, en los tratamientos testigos. Los tratamientos de omisión no presentaron diferencias significativas ($P < 0,05$) en los suelos de Esmeraldas, El Oro y Los Ríos. En todos los suelos se presentó un incremento de la materia seca aérea excepto en los suelos del Guayas con la omisión de S, donde hubo una reducción de 0,02 g vaso⁻¹.

Interacción entre la omisión de nutrientes y el tipo de suelo sobre la materia seca en raíces de plántulas de arroz

Los resultados del efecto de la interacción entre la omisión de nutrientes y tipos de suelos, sobre la producción de materia seca radical (MSR), se observan en el Cuadro 6. El análisis de varianza de la concentración de Cd en las raíces de las plántulas de arroz determinó diferencias estadísticas significativas ($P < 0,05$) en los suelos del Guayas, El Oro, Los Ríos y Sucumbíos por la omisión de nutrientes.

Cuadro 6. Efecto de interacción entre la omisión de nutrientes y el tipo de suelo sobre la producción de materia seca promedio del sistema radical de plántulas de (*Oryza sativa*). Ecuador, 2018.

Table 6. Interaction effect between nutrient omission and soil type on average dry matter production of rice (*Oryza sativa*) seedling root system, Ecuador, 2018.

Tratamiento	Esmeraldas	Guayas	Manabí	El Oro	Los Ríos	Sucumbíos
Testigo	1,131 ns	0,682 ab	0,816 ns	0,625 ns	0,796 a	0,681 ab
Test+Cd	1,113 ns	0,454 b	0,584 ns	0,503 ns	0,533 b	0,444 b
Completo	1,066 ns	0,716 ab	0,519 ns	0,581 ns	0,935 a	0,924 a
(-N)	1,040 ns	0,601 ab	0,433 ns	0,658 ns	0,899 a	0,777 ab
(-P)	1,166 ns	1,043 a	0,684 ns	0,923 ns	0,886 a	0,810 a
(-K)	1,006 ns	0,639 ab	0,623 ns	0,783 ns	0,894 a	0,870 a
(-S)	1,213 ns	0,771 ab	0,683 ns	0,783 ns	0,971 a	0,832 a
(-Mg)	1,279 ns	0,766 ab	0,573 ns	0,768 ns	0,978 a	0,820 a
(-Ca)	1,111 ns	0,919 ab	0,739 ns	0,713 ns	0,956 a	0,908 a

Los promedios con igual letra en columna no son diferentes significativamente según la prueba estadística de medias de Tukey ($P < 0,05$). / Averages with the same letter in the column are not significantly different according to Tukey's statistical test of means ($P < 0,05$).

Dentro de los suelos contaminados con Cd, la omisión de N redujo en mayor proporción la producción de MSR en todos los suelos evaluados, siendo el suelo de Guayas quien presentó la mayor disminución con respecto al testigo+Cd con un 0,59 g vaso⁻¹.

En el suelo de Los Ríos la omisión de K y P redujo la concentración de Cd en las raíces de las plántulas de arroz en 0,44 y 036 g vaso⁻¹ respectivamente; y en Esmeraldas solo el P afectó de forma negativa la producción de MSR en un 0,11 g vaso⁻¹ (Cuadro 6).

La producción de MSR del arroz fue afectada por la adición del Cd en todos los suelos, siendo el más afectado el suelo de Los Ríos con una disminución de 0,26 g vaso⁻¹ y el menos afectado el de Esmeraldas con una reducción de 0,02 g vaso⁻¹.

Discusión

Las concentraciones de Cd en la raíz siempre fueron mayores a las de la parte aérea, con valores promedio de 0,49 mg kg⁻¹ y 0,10 mg kg⁻¹, respectivamente, lo que concuerda con Li et al. (2019) quienes al sembrar plantas de arroz en suelos contaminados con 5,88 mg kg⁻¹ de Cd, encontraron concentraciones de 6,99 mg kg⁻¹ de Cd en la raíz y solo 1,03 mg kg⁻¹ de Cd, en las hojas.

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 (Cuadro 3), indicativo de sinergismo entre el N y el Cd, resultados que concuerdan con lo establecido por Nasraoui-Hajaji et al. (2012) quienes encontraron sinergismo en tomate hidropónico, con la adición de 0,5 y 25 μM de Cd en forma de CdCl₂ y con dos tipos de fertilizantes nitrogenados (nitrato de potasio y sulfato de amonio), lo que les llevó a la conclusión de que con el nitrato se presentaba mayor absorción de Cd que con el amonio, concordando con el resultado de esta investigación, donde se utilizó nitratos para la elaboración de las soluciones de fertilización, similar a lo reportado por Wu et al. (2018) sobre los mecanismos fisiológicos y genéticos implicados en la absorción de Cd por las raíces, la translocación xilemática y la subsiguiente acumulación de Cd en arroz (*O. sativa*) con diferentes proporciones NO₃⁻/NH₄⁺ bajo condiciones de estrés por Cd, quienes concluyeron que el aumento de la nutrición amoniacal contribuye a la inhibición de la captación de Cd, el transporte xilemático y la posterior acumulación en arroz.

Los resultados obtenidos en el suelo de Los Ríos concuerdan con Sadeghipour (2018) quien, al aplicar dosis de potasio (K) (0, 200 y 400 mg kg⁻¹ suelo) para reducir la toxicidad del Cd en la judía común (*Phaseolus vulgaris* L.), en un suelo franco-arenoso contaminado con 100 mg kg⁻¹ de Cd, concluye que la aplicación de K podría utilizarse para la detoxificación de Cd en plantas de judía común. De acuerdo con lo expresado por Naciri et al. (2021) el K a una concentración de 310 mg kg⁻¹ en plantas de tomate (variedad Campbell 33), redujo significativamente la translocación de Cd de la raíz al brote y mejoró los parámetros de crecimiento en presencia de Cd. La suplementación con K puede reducir el efecto negativo del Cd, mejorar la fotosíntesis y promover la síntesis de clorofila.

En el Cuadro 4 se observa que las concentraciones de Cd en la raíz fueron mayores a las de la parte aérea, lo que concuerda con Li et al. (2019) quienes al sembrar plantas de arroz en suelos contaminados con 5,88 mg de Cd kg⁻¹ de suelo, encontraron concentraciones de 6,99 mg kg⁻¹ de Cd en la raíz y solo 1,03 mg kg⁻¹ de Cd en las hojas. La omisión de S provocó efectos variados en los suelos (Cuadro 4), lo que coincide con lo encontrado por Bashir et al. (2015) quienes señalan que los compuestos ricos en S permiten a las plantas aumentar sus defensas celulares y/o secuestrar el Cd en vacuolas, mediadas por las fitocelatinas.

Para los suelos de Esmeraldas y Sucumbíos, que presentan un pH <5 (muy ácido), el efecto que presentan es una disminución de la concentración de Cd en 0,32 y 1,14 mg kg⁻¹, respectivamente, lo que coincide con lo afirmado por Yang et al. (2018) quienes llevaron a cabo un ensayo en arroz demostrando que la disponibilidad Cd del suelo y sus contenidos intercambiables, disminuyeron con el aumento del encalado, por lo que concluyeron que la acumulación de Cd en arroz cultivado en suelos ligeramente ácidos presenta un equilibrio dinámico contradictorio entre la capacidad de absorción de Cd por las raíces y la inmovilización de Cd en el suelo en respuesta al encalado.

En todos los suelos, la fertilización provocó incremento en la MSA y las omisiones de nutrientes actuaron según el suelo. Con la omisión de N se redujo en mayor proporción la producción de materia seca en los suelos de Sucumbíos, Los Ríos, El Oro y Manabí, siendo esperado este efecto en suelos tropicales, por ser deficientes en este elemento que es importante para la producción de materia seca (Omar et al., 2020). Para los suelos de Esmeraldas la omisión de Mg provocó la mayor disminución con un 14,3%, por ser suelos con bajos contenidos de este nutriente que provocó un desbalance catiónico (Cole et al., 2016).

Los efectos del N serían provocados por el bajo contenido de materia orgánica (Babalar et al., 2023) y del K por los contenidos elevados de Ca en el suelo (González et al., 2020). Es importante señalar que excepto en el suelo de Sucumbíos, los restantes cinco suelos presentaron incremento en la MSR con las omisiones de S, Mg

y Ca, al ser comparados con el tratamiento de fertilización completa. En un experimento realizado con arroz de secano en diferentes suelos ferralisoles tropicales aplicando la técnica de omisión de P, Ca, N y Mg, encontraron que hubo una reducción significativa de materia seca de brotes y raíces. Sin embargo, los principales nutrientes limitantes no fueron los mismos en ambos suelos, se observó que las deficiencias de multinutrientes observadas para el crecimiento del arroz en los Ferralsoles son específicas del lugar, aunque la limitación de P parece ser común (Raminoarison et al., 2020).

Conclusiones

Con la omisión de N y P se redujo la absorción de cadmio en plantas de arroz, dado que con la omisión de estos macronutrientes se disminuyó en mayor proporción la producción de materia seca en los suelos de Sucumbíos, Los Ríos, El Oro y Manabí lo que se traduce en una menor contaminación de los granos de estas plantas, garantizando con ello la inocuidad de los alimentos

Al cuantificar la producción de materia seca, la técnica de omisión de nutrientes provocó una reducción de la producción de materia seca que afectó los rendimientos de la planta, lo que puede ser una limitante para la aplicación del método.

La técnica de omisión de nutrientes fue comparada en condiciones de suelos contrastantes del Ecuador, y se encontró que, en los suelos de Esmeraldas y Sucumbíos, que presentaron un pH <5 (muy ácido) y en suelos de pH alcalino como Guayas y Manabí, se observó una disminución de la absorción de Cd.

Si bien la técnica de omisión de nutrientes es una condición beneficiosa para evaluar desde el punto de vista ambiental, estas condiciones extremas afectan la producción de materia seca y por lo tanto, el rendimiento del cultivo de arroz.

Referencias

- Alves, A. N., Souza, F. G., Chaves, L. H., Sousa, J. A., & Vasconcelos, A. C. (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>
- Babalar, M., Daneshvar, H., Díaz-Pérez, J. C., Nambeesan, S., Tabrizi, L., & Delshad, M. (2023). Effects of organic and chemical nitrogen fertilization and postharvest treatments on the visual and nutritional quality of fresh-cut celery (*Apium graveolens* L.) during storage. *Food Science & Nutrition*, 11(1), 320–333. <https://doi.org/10.1002/fsn3.3063>
- Bacon, J. R., & Hudson, G. (2001). A flexible methodology for the characterisation of soils: a case study of the heavy metal status of a site at Dornach. *Science of the Total Environment*, 264(1-2), 153–162. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(00\)00617-3](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(00)00617-3)
- Bashir, H., Ibrahim, M. M., Bagheri, R., Ahmad, J., Arif, I. A., Baig, M. A., & Qureshi, M. I. (2015). Influence of sulfur and cadmium on antioxidants, phytochelatins and growth in Indian mustard. *AoB Plants*, 7, Article plv001. <https://doi.org/10.1093/aobpla/plv001>
- Carrillo, M. D. (2003). *Caracterizacáo das formas de metais pesados, sua biodisponibilidade e suas dinâmicas de adsorcao em solos do Equador* [Tese de mestrado, Universidade Federal de Vicosa]. Repositório Universidade Federal de Vicosa. <https://www.locus.ufv.br/handle/123456789/10826>

- Cole, J. C., Smith, M. W., Penn, C. J., Cheary, B. S., & Conaghan, K. J. (2016). Nitrogen, phosphorus, calcium, and magnesium applied individually or as a slow release or controlled release fertilizer increase growth and yield and affect macronutrient and micronutrient concentration and content of field-grown tomato plants. *Scientia Horticulturae*, *211*, 420–430. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2016.09.028>
- Di Rienzo, J. A., Casanoves, F., Balzarini, M. G., Gonzalez, L., Tablada, M., & Robledo, C. W. (2020). *Infostat* (Versión 2020) [Programa de computadora]. Grupo InfoStat. <https://www.infostat.com.ar/index.php?mod=page&id=15>
- Fernandes, R., Carrillo, M., & Ferreira, M. P. (2012). *Avaliação do método Neubauer para estudos do efeito de condicionadores do solo sobre a produção vegetal em solos contaminados com cádmio*. FertBio – Sociedade Brasileira de Ciência do Solo.
- Gardi, C., Angelini, M., Barceló, S., Comerma, J., Cruz Gaistardo, C., Encina Rojas, A., Jones, A., Krasilnikov, P., Mendonça Santos Brefin, M. L., Montanarella, L., Muniz Ugarte, O., Schad, P., Vara Rodríguez, M. I., & Vargas, R. (Eds.) (2014). *Atlas de suelos de América Latina y el Caribe*. Comisión Europea, Oficina de Publicaciones de la Unión Europea. <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/1001699/1/ATLASLAC.pdf>
- Genchi, G., Sinicropi, M. S., Lauria, G., Carocci, A., & Catalano, A. (2020). The effects of cadmium toxicity. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *17*(11), Article 3782. <http://doi.org/10.3390/ijerph17113782>
- González, M., Ríos, D., Peña-Rojas, K., García, E., Acevedo, M., Cartes, E., & Sánchez-Olate, M. (2020). Efecto de la concentración de fósforo y calcio sobre atributos morfo-fisiológicos y potencial de crecimiento radical en plantas de *Aextoxicon punctatum* producidas a raíz cubierta en la etapa de endurecimiento. *Bosque (Valdivia)*, *41*(2), 137–146. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002020000200137>
- González-Fuentes, J. A., Jiménez-López, D., Sandoval-Rangel, A., Hernández-Perez, A., Medrano-Macías, J., & Preciado-Rangel, P. (2020). Efecto de enmiendas minerales sobre el contenido mineral y antioxidantes en frutos de frambuesa. *Biocencia*, *22*(1), 48–55. <https://doi.org/10.18633/biocencia.v22i1.1124>
- Hasang Morán, E. S., Carrillo Zenteno, M. D., Durango Cabanilla, W. D., & Morales Intriago, 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), 44–50. <https://revistas.utb.edu.ec/index.php/sr/article/view/465>
- Hidayati, N., & Rini, D. S. (2020). Assessment of plants as lead and cadmium accumulators for phytoremediation of contaminated rice field. *Biodiversitas*, *21*(5), 1928–1934. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d210520>
- Ibaraki, T., Kuroyanagi, N., & Murakami, M. (2009). Practical phytoextraction in cadmium-polluted paddy fields using a high cadmium accumulating rice plant cultured by early drainage of irrigation water. *Soil Science and Plant Nutrition*, *55*(3), 421–427. <https://doi.org/10.1111/j.1747-0765.2009.00367.x>
- Khan, T. A., Chaudhry, S. A., & Ali, I. (2015). Equilibrium uptake, isotherm and kinetic studies of Cd (II) adsorption onto iron oxide activated red mud from aqueous solution. *Journal of Molecular Liquids*, *202*, 165–175. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2014.12.021>
- Klein, V. A. (2008). *Física do solo* (2a edição). Editora da Universidade de Passo Fundo.
- Li, H., Luo, N., Li, Y. W., Li, H. Y., Mo, C. H., & Wong, M. H. (2017). Cadmium in rice: transport mechanisms, influencing factors, and minimizing measures. *Environmental Pollution*, *224*, 622–630. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.01.087>
- Li, H., Yu, Y., Chen, Y., Li, Y., Wang, M., & Wang, G. (2019). Biochar reduced soil extractable Cd but increased its accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) cultivated on contaminated soils. *Journal of Soils and Sediments*, *19*, 862–871. <https://doi.org/10.1007/s11368-018-2072-6>

- Martínez Madrid, D. E., & Marrugo-Negrete, J. (2021). Efecto de la adición de enmiendas en la inmovilización de metales pesados en suelos mineros del sur de Bolívar, Colombia. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 22(2), Article e2272. https://doi.org/10.21930/rcta.vol22_num2_art:2272
- Naciri, R. L., Benadis, C., Chtouki, M., & Oukarroum, A. (2021). Interactive effect of potassium and cadmium on growth, root morphology and chlorophyll a fluorescence in tomato plant. *Scientific Reports*, 11, Article 5384. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-84990-4>
- Nasraoui-Hajaji, A., Gouia, H., Carrayol, E., & Haouari-Chaffei, C. (2012). Ammonium alleviates redox state in solanum seedlings under cadmium stress conditions. *Journal of Environmental & Analytical Toxicology*, 2, Article 141. <http://doi.org/10.4172/2161-0525.1000141>
- Omar, L., Ahmed, O. H., Jalloh, M. B., & Nik Muhamad, A. M. (2020). Soil nitrogen fractions, nitrogen use efficiency and yield of *Zea mays* L. grown on a tropical acid soil treated with composts and clinoptilolite zeolite. *Applied Sciences*, 10(12), Article 4139. <http://dx.doi.org/10.3390/app10124139>
- Quezada-Crespo, C. J., Carrillo-Zenteno, M. D., Morales-Intriago, F. L., & Carrillo-Alvarado, 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), 235–240. https://revistas.unal.edu.co/index.php/acta_agronomica/article/view/55026
- Raminoarison, M., Razafimbelo, T., Rakotoson, T., Becquer, T., Blanchart, E., & Trap, J. (2020). Multiple-nutrient limitation of upland rainfed rice in ferralsols: A greenhouse nutrient-omission trial. *Journal of Plant Nutrition*, 43(2), 270–284. <https://doi.org/10.1080/01904167.2019.1676906>
- Sadeghipour, O. (2018). Enhancing cadmium tolerance in common bean plants by potassium application. *The Philippine Agricultural Scientist*, 101(2), 167–175.
- Sánchez, N., Rivero, C., & Martínez, Y. (2011). Cadmio disponible en dos suelos de Venezuela: efecto del fósforo. *Revista Ingeniería UC*, 18(2), 7–14. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/refame/issue/download/5615/1856>
- Wu, J., Li, R., Lu, Y., & Bai, Z. (2021). Sustainable management of cadmium-contaminated soils as affected by exogenous application of nutrients: a review. *Journal of Environmental Management*, 295, Article 113081. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113081>
- Wu, Z., Zhang, W., Xu, S., Shi, H., Wen, D., Huang, Y., Peng, L., Deng, T., Du, R., Li, F., Wang, X., & Wang, F. (2018). Increasing ammonium nutrition as a strategy for inhibition of cadmium uptake and xylem transport in rice (*Oryza sativa* L.) exposed to cadmium stress. *Environmental and Experimental Botany*, 155, 734–741. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2018.08.024>
- Yang, Y., Chen, J., Huang, Q., Tang, S., Wang, J., Hu, P., & Shao, G. (2018). Can liming reduce cadmium (Cd) accumulation in rice (*Oryza sativa*) in slightly acidic soils? A contradictory dynamic equilibrium between Cd uptake capacity of roots and Cd immobilisation in soils. *Chemosphere*, 193, 547–556. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.11.061>
- Yarce, C. J., & Castillo, J. E. (2014). Validación no exhaustiva del método analítico de Walkley–Black, para la determinación de materia orgánica en suelos por espectrofotometría de UV-VIS. *Ingenium*, 8(19), 37–45.
- Zaid, A., Bhat, J. A., Wani, S. H., & Masoodi, K. Z. (2019). Role of nitrogen and sulfur in mitigating cadmium induced metabolism alterations in plants. *The Journal of Plant Science Research*, 35(1), 121–141.
- Zeng, T., Athar Khaliq, M., Li, H., Jayasuriya, P., Guo, J., Li, Y., & Wang, G. (2020). Assessment of Cd availability in rice cultivation (*Oryza sativa*): Effects of amendments and the spatiotemporal chemical changes in the rhizosphere and bulk soil. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 196, Article 110490. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110490>