

	MACROPROCESO DE APOYO	CÓDIGO: AAAR113
	PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO	VERSIÓN: 6
	DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL	VIGENCIA: 2021-09-14
		PAGINA: 1 de 13

21.1

FECHA	lunes, 9 de enero de 2023
--------------	---------------------------

Señores
UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA
 BIBLIOTECA
 Ciudad

UNIDAD REGIONAL	Sede Fusagasugá
TIPO DE DOCUMENTO	Trabajo De Grado
FACULTAD	Ciencias Agropecuarias
NIVEL ACADÉMICO DE FORMACIÓN O PROCESO	Pregrado
PROGRAMA ACADÉMICO	Ingeniería Agronómica

El Autor(Es):

APELLIDOS COMPLETOS	NOMBRES COMPLETOS	No. DOCUMENTO DE IDENTIFICACIÓN
Cubillos Rodríguez	Liuba Esperanza	1007466533

Director(Es) y/o Asesor(Es) del documento:

APELLIDOS COMPLETOS	NOMBRES COMPLETOS
Lizarazo Hernández	Karol de los Angeles

Diagonal 18 No. 20-29 Fusagasugá – Cundinamarca
 Teléfono: (091) 8281483 Línea Gratuita: 018000180414
www.ucundinamarca.edu.co E-mail: info@ucundinamarca.edu.co
 NIT: 890.680.062-2

*Documento controlado por el Sistema de Gestión de la Calidad
 Asegúrese que corresponde a la última versión consultando el Portal Institucional*

	MACROPROCESO DE APOYO	CÓDIGO: AAAR113
	PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO	VERSIÓN: 6
	DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL	VIGENCIA: 2021-09-14
		PAGINA: 2 de 13

TÍTULO DEL DOCUMENTO

Microorganismos rizosféricos y su capacidad biorremediadora de cadmio en el cultivo de cacao (*Theobroma cacao*) – Una revisión

SUBTÍTULO

(Aplica solo para Tesis, Artículos Científicos, Disertaciones, Objetos Virtuales de Aprendizaje)

EXCLUSIVO PARA PUBLICACIÓN DESDE LA DIRECCIÓN INVESTIGACIÓN

INDICADORES	NÚMERO
ISBN	
ISSN	
ISMN	

AÑO DE EDICIÓN DEL DOCUMENTO	NÚMERO DE PÁGINAS
28/11/2022	40

DESCRIPTORES O PALABRAS CLAVES EN ESPAÑOL E INGLÉS (Usar 6 descriptores o palabras claves)

ESPAÑOL	INGLÉS
1. Biorremediación	Bioremediation
2. Cadmio	Cadmium
3. Microorganismos rizosféricos	Rhizospheric microorganisms
4. Biometeorización microbiana	Bacterial bioweathering
5. Cacao	Cocoa
6. Hiperbioacumulación	Hyperbiocumulation

FUENTES (Todas las fuentes de su trabajo, en orden alfabético)

- Abbas, S. Z., Rafatullah, M., Hossain, K., Ismail, N., Tajarudin, H. A., & Abdul Khalil, H. P. S. (2017). A review on mechanism and future perspectives of cadmium-resistant bacteria. *International Journal of Environmental Science and Technology* 15:1, 15(1), 243–262. <https://doi.org/10.1007/S13762-017-1400-5>
- Agbeniyi, S. O., Ogunlade, M. O., & Oluyole, K. A. (2010). *Fertilizer use and cocoa production in cross river state , nigeria. Journal of Agricultural and Biological Science*, 5(3), 10–13. 5(3), 10–13.
- Aikpokpodion, P. E., Lajide, L., & Aiyesanmi, A. F. (2012). Metal fractionation in soils collected from selected cocoa plantations in ogun state, Nigeria. *World Applied*

	MACROPROCESO DE APOYO	CÓDIGO: AAAR113
	PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO	VERSIÓN: 6
	DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL	VIGENCIA: 2021-09-14
		PAGINA: 3 de 13

Sciences Journal, 20(5), 628–636. <https://doi.org/10.5829/idosi.wasj.2012.20.05.2769>

Al Qabany, A., Soga, K., & Santamarina, C. (2012). Factors Affecting Efficiency of Microbially Induced Calcite Precipitation. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 138(8), 992–1001. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000666](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000666)

Aryal, M. (2021). A comprehensive study on the bacterial biosorption of heavy metals: Materials, performances, mechanisms, and mathematical modellings. *Reviews in Chemical Engineering*, 37(6), 715–754. <https://doi.org/10.1515/REVCE-2019-0016/XML>

Ayangbenro, A. S., & Babalola, O. O. (2017). A New Strategy for Heavy Metal Polluted Environments: A Review of Microbial Biosorbents. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(1). <https://doi.org/10.3390/IJERPH14010094>

Barraza, F., Schreck, E., Lévêque, T., Uzu, G., López, F., Ruales, J., Prunier, J., Marquet, A., & Maurice, L. (2017). Cadmium bioaccumulation and gastric bioaccessibility in cacao: A field study in areas impacted by oil activities in Ecuador. *Environmental Pollution*, 229, 950–963. <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2017.07.080>

Beltrán-Pineda, M. E., & Gómez-Rodríguez, A. M. (2016). Biorremediación de metales pesados cadmio (Cd), cromo (Cr) y mercurio (Hg), mecanismos bioquímicos e ingeniería genética: una revisión. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*, 12(2), 172–197. <https://doi.org/10.18359/rfcb.2027>

Bertoldi, D., Barbero, A., Camin, F., Caligiani, A., & Larcher, R. (2016). Multielemental fingerprinting and geographic traceability of Theobroma cacao beans and cocoa products. *Food Control*, 65, 46–53. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2016.01.013>

Beveridge, T. J. (1989). Role of cellular design in bacterial metal accumulation and mineralization. *Annual Review of Microbiology*, 43, 147–171. <https://doi.org/10.1146/ANNUREV.MI.43.100189.001051>

Bhattacharya, A., Naik, S. N., & Khare, S. K. (2018). Harnessing the bio-mineralization ability of urease producing *Serratia marcescens* and *Enterobacter cloacae* EMB19 for remediation of heavy metal cadmium (II). *Journal of Environmental Management*, 215, 143–152. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2018.03.055>

Bhayani, A., Mehta, K., Bhattacharya, S., Mishra, S., & Dineshkumar, R. (2020). Microbial-assisted heavy metal remediation: Bottlenecks and prospects. *Removal of Toxic Pollutants Through Microbiological and Tertiary Treatment*, 349–372. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821014-7.00014-9>

Bravo, C. P. (2020). Metales pesados: Fuentes y su toxicidad sobre la salud humana. (2019)Revista de investigación de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann. <https://doi.org/10.33326/27066320.2018.1.842>

Bravo, D., & Braissant, O. (2022). Cadmium-tolerant bacteria: current trends and applications in agriculture. *Letters in Applied Microbiology*, 74(3), 311–333. <https://doi.org/10.1111/lam.13594>

Bravo, D., Pardo-Díaz, S., Benavides-Eraza, J., Rengifo-Estrada, G., Braissant, O., &

	MACROPROCESO DE APOYO	CÓDIGO: AAAR113
	PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO	VERSIÓN: 6
	DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL	VIGENCIA: 2021-09-14
		PAGINA: 4 de 13

Leon-Moreno, C. (2018). Cadmium and cadmium-tolerant soil bacteria in cacao crops from northeastern Colombia. *Journal of Applied Microbiology*, 124(5), 1175–1194. <https://doi.org/10.1111/jam.13698>

Bravo & Benavides, J. (2020). The Use of a Two-Dimensional Electrical Resistivity Tomography (2D-ERT) as a Technique for Cadmium Determination in Cacao Crop Soils. *Applied Sciences* 2020, Vol. 10, Page 4149, 10(12), 4149. <https://doi.org/10.3390/APP10124149>

Cadmio, este asesino silencioso, escondido en fertilizantes con fosfatos - Red de Desarrollo Sostenible de Colombia. (n.d.). Retrieved September 12, 2022, from <https://www.rds.org.co/es/cadmio-este-asesino-silencioso-escondido-en-fertilizantes>

Canchignia Martínez, F.; Auhing Arcos, J.; Cedeño Moreira, Á.; Carrillo, M.; Bravo, D. . (2021). Mitigación De Cadmio Por Microorganismos. In *Caja de herramientas para prevención y mitigación de la contaminación de cadmio en la cadena de cacao-Ecuador*. https://balcon.mag.gob.ec/mag01/magapaldia/Caja de Herramientas_Cadmio_Cacao/Guia_12.pdf

Castillo, J., Pérez-López, R., Caraballo, M. A., Nieto, J. M., Martins, M., Costa, M. C., Olías, M., Cerón, J. C., & Tucoulou, R. (2012). Biologically-induced precipitation of sphalerite–wurtzite nanoparticles by sulfate-reducing bacteria: Implications for acid mine drainage treatment. *Science of The Total Environment*, 423, 176–184. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2012.02.013>

Castillo, J., Pérez-López, R., Sarmiento, A. M., & Nieto, J. M. (2012). Evaluation of organic substrates to enhance the sulfate-reducing activity in phosphogypsum. *The Science of the Total Environment*, 439, 106–113. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2012.09.035>

Castro, A. V, de Almeida, A.-A. F., Pirovani, C. P., Reis, G. S. M., Almeida, N. M., & Mangabeira, P. A. O. (2015). Morphological, biochemical, molecular and ultrastructural changes induced by Cd toxicity in seedlings of Theobroma cacao L. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 115, 174–186. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2015.02.003>

Chancay Alcívar, L. F., Delgado Demera, M., & Salas Macías, C. A. (2022). Cadmio en el cultivo de cacao (Theobroma cacao L.) y sus efectos ambientales. *La Técnica: Revista de Las Agrociencias*. ISSN 2477-8982, 91. https://doi.org/10.33936/la_tecnica.v0i0.4324

Comisi, L. A., Alimentaria, C., Alimentaria, C., Alimentarios, A., Alimentarios, A., Europea, A., & Alimentaria, S. (2011). Statement on tolerable weekly intake for cadmium. *EFSA Journal*, 9(2), 10–14. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2011.1975>

Covelo, E. F., Vega, F. A., & Andrade, M. L. (2007). Heavy metal sorption and desorption capacity of soils containing endogenous contaminants. *Journal of Hazardous Materials*, 143(1–2), 419–430. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2006.09.047>

Fernández, J., & Rodríguez, F. (2019). *Ciencia Unisalle De cacao , cadmio y micorrizas : un vínculo genético insospechado.*

Doaré, F., Ribeyre, F., & Cilas, C. (2020). Genetic and environmental links between traits

	MACROPROCESO DE APOYO	CÓDIGO: AAAR113
	PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO	VERSIÓN: 6
	DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL	VIGENCIA: 2021-09-14
		PAGINA: 5 de 13

of cocoa beans and pods clarify the phenotyping processes to be implemented. *Scientific Reports*, 10(1), 1–6. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-66969-9>

Elsas, J. D. van (Jan D. . (n.d.). *Modern soil microbiology*. Retrieved October 27, 2022, from <https://www.perlego.com/book/2193523/modern-soil-microbiology-third-edition-pdf>

Felipe, J., & Pineda, S. (2019). *Efecto de las comunidades locales de hongos formadores de micorrizas arbusculares y patrones de injertación en la fisiología de plántulas de cacao sometidas a estrés por cadmio y zinc. Tesis de maestría. 148 p.*

Grant, C. A., Clarke, J. M., Duguid, S., & Chaney, R. L. (2008). Selection and breeding of plant cultivars to minimize cadmium accumulation. *Science of The Total Environment*, 390(2–3), 301–310. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2007.10.038>

Guerra, B. E., Muñoz Guerrero, J., Gutierrez, E., & Duarte, D. (2018, September 19). *Cacao: Cadmio y Biorremediacion - Engormix*. <https://www.engormix.com/agricultura/articulos/cacao-cadmio-biorremediacion-t42789.htm>

Harris-Valle, C., Esqueda, M., Valenzuela-Soto, E. M., & Castellanos, A. E. (2009). Tolerancia al estrés hídrico en la interacción planta-hongo micorrízico arbuscular: Metabolismo energético y fisiología. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 32(4), 265–271. <https://doi.org/10.35196/RFM.2009.4.265-271>

Hou, D., O'Connor, D., Igalavithana, A. D., Alessi, D. S., Luo, J., Tsang, D. C. W., Sparks, D. L., Yamauchi, Y., Rinklebe, J., & Ok, Y. S. (2020). Metal contamination and bioremediation of agricultural soils for food safety and sustainability. *Nature Reviews Earth & Environment* 2020 1:7, 1(7), 366–381. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0061-y>

Kang, C. H., Han, S. H., Shin, Y., Oh, S. J., & So, J. S. (2014). Bioremediation of Cd by microbially induced calcite precipitation. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 172(4), 1929–1937. <https://doi.org/10.1007/S12010-013-0626-Z>

Kenney, J. P. L., & Fein, J. B. (2011). Importance of extracellular polysaccharides on proton and Cd binding to bacterial biomass: A comparative study. *Chemical Geology*, 286(3–4), 109–117. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMGEO.2011.04.011>

Khadinia, E., Sharafi, H., Hadi, F., Zahiri, H. S., Modiri, S., Tohidi, A., Mousavi, A., Salmanian, A. H., & Noghabi, K. A. (2014). Cadmium biosorption by a glyphosate-degrading bacterium, a novel biosorbent isolated from pesticide-contaminated agricultural soils. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 20(6), 4304–4310. <https://doi.org/10.1016/J.JIEC.2014.01.037>

Krebs, W., Brombacher, C., Bosshard, P. P., Bachofen, R., & Brandl, H. (1997). Microbial recovery of metals from solids. *FEMS Microbiology Reviews*, 20(3–4), 605–617. <https://doi.org/10.1111/J.1574-6976.1997.TB00341.X>

Long, J., Yu, M., Xu, H., Huang, S., Wang, Z., & Zhang, X. X. (2021). Characterization of cadmium biosorption by inactive biomass of two cadmium-tolerant endophytic bacteria *Microbacterium* sp. D2-2 and *Bacillus* sp. C9-3. *Ecotoxicology (London, England)*, 30(7), 1419–1428. <https://doi.org/10.1007/S10646-021-02363-Z>

	MACROPROCESO DE APOYO	CÓDIGO: AAAR113
	PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO	VERSIÓN: 6
	DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL	VIGENCIA: 2021-09-14
		PAGINA: 6 de 13

- Maddela, N. R., Kakarla, D., García, L. C., Chakraborty, S., Venkateswarlu, K., & Megharaj, M. (2020). Cocoa-laden cadmium threatens human health and cacao economy: A critical view. *Science of the Total Environment*, 720, 137645. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137645>
- Marrero-Coto, J., Díaz-Valdivia, A., & Coto-Pérez, O. (2010). Mecanismos moleculares de resistencia a metales pesados en las bacterias y sus aplicaciones en la biorremediación. *Revista CENIC Ciencias Biológicas*, 41(1), 001–012. <https://revista.cnic.edu.cu/index.php/RevBiol/article/view/609>
- Mishra, G. K. (2017). Microbes in Heavy Metal Remediation: A Review on Current Trends and Patents. *Recent Patents on Biotechnology*, 11(3). <https://doi.org/10.2174/1872208311666170120121025>
- Nieves, Parra, Villanueva, & Henriquez. (2019). (PDF) *Nota técnica: biorremediación, enemigo del cadmio*. Revista Ingeniería UC. https://www.researchgate.net/publication/332856216_Tech_note_bioremediation_enemy_of_cadmium
- Oliveira, B. R. M., de Almeida, A. A. F., Santos, N. de A., & Pirovani, C. P. (2022). Tolerance strategies and factors that influence the cadmium uptake by cacao tree. *Scientia Horticulturae*, 293(September 2020), 110733. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110733>
- Pócsi, I. (2011). Toxic Metal/Metalloid Tolerance in Fungi—A Biotechnology-Oriented Approach. *Cellular Effects of Heavy Metals*, 31–58. https://doi.org/10.1007/978-94-007-0428-2_2
- Ramtahal, G., Chang-yen, I., Bekele, I., & Harrynanan, L. (2012). Investigation of the effects of mycorrhizal fungi on cadmium. *Proceedings of the Caribbean Food Crops Society*, 48(May), 147–152.
- Rivera Mendez, Y., Galindo Castañeda, T., Caicedo, A. F., Navia, E. A., & Romero, H. M. (2014). Boletín Técnico N° 35. Hongos Formadores de Micorrizas Arbusculares (HFMA) en Palma de Aceite. In *Boletín Técnico N° 35 CENIPALMA* (Issue 35).
- Sanchez, G. (2016). Ecotoxicología del cadmio: riesgo para la salud de la utilización de suelos ricos en cadmio. *Facultad De Farmacia Universidad Complutense Trabajo*, 5(6), 23. http://147.96.70.122/Web/TFG/TFG/Memoria/GARA_SANCHEZ_BARRON.pdf
- Scaccabarozzi, D., Castillo, L., Aromatisi, A., Milne, L., Castillo, A. B., & Muñoz-Rojas, M. (2020). Soil, site, and management factors affecting cadmium concentrations in cacao-growing soils. *Agronomy*, 10(6), 1–15. <https://doi.org/10.3390/agronomy10060806>
- Shukla, P. K., Misra, P., Maurice, N., & Ramteke, P. W. (2019). Heavy metal toxicity and possible functional aspects of microbial diversity in heavy metal-contaminated sites. *Microbial Genomics in Sustainable Agroecosystems: Volume 2*, 255–317. https://doi.org/10.1007/978-981-32-9860-6_15/TABLES/8
- Singh, S., Kumar, V., Datta, S., Dhanjal, D. S., Sharma, K., Samuel, J., & Singh, J. (2020). Current advancement and future prospect of biosorbents for bioremediation. *Science*

	MACROPROCESO DE APOYO	CÓDIGO: AAAR113
	PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO	VERSIÓN: 6
	DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL	VIGENCIA: 2021-09-14
		PAGINA: 7 de 13

of *The Total Environment*, 709, 135895.
<https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2019.135895>

Tabak, H. H., Lens, P., Van Hullebusch, E. D., & Dejonghe, W. (2005). Developments in Bioremediation of Soils and Sediments Polluted with Metals and Radionuclides – 1. Microbial Processes and Mechanisms Affecting Bioremediation of Metal Contamination and Influencing Metal Toxicity and Transport. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology 2005 4:3, 4(3)*, 115–156.
<https://doi.org/10.1007/S11157-005-2169-4>

Varjani, S. J., Kumar, A., Gnansounou, A. E., & Gurunathan, B. (n.d.). *Bioremediation: Applications for Environmental Protection and Management Energy, Environment, and Sustainability*. Retrieved October 27, 2022, from <http://www.springer.com/series/15901>

Wuellins, D., Caicedo, M., Vera, D., Sotomayor, I., Saini, E., & Chávez, E. F. (2019). *Cadena del valor del cacao*.
https://www.fontagro.org/new/uploads/adjuntos/Informe_CACAO_linea_base.pdf

Xiao, L., Yu, Z., Liu, H., Tan, T., Yao, J., Zhang, Y., & Wu, J. (2020). Effects of Cd and Pb on diversity of microbial community and enzyme activity in soil. *Ecotoxicology (London, England)*, 29(5), 551–558. <https://doi.org/10.1007/S10646-020-02205-4>

Xu, S., Luo, X., Huang, Q., & Chen, W. (2021). Calcium-crosslinked alginate-encapsulated bacteria for remediating of cadmium-polluted water and production of CdS nanoparticles. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 105(5), 2171–2179.
<https://doi.org/10.1007/S00253-021-11155-8/FIGURES/6>

Yang, Z., Shi, W., Yang, W., Liang, L., Yao, W., Chai, L., Gao, S., & Liao, Q. (2018). Combination of bioleaching by gross bacterial biosurfactants and flocculation: A potential remediation for the heavy metal contaminated soils. *Chemosphere*, 206, 83–91. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2018.04.166>

Yasmeen, T., Li, A., Iqbal, S., Arif, M. S., Riaz, M., Shahzad, S. M., & Ali, S. (2019). Biotechnological Tools in the Remediation of Cadmium Toxicity. *Cadmium Tolerance in Plants: Agronomic, Molecular, Signaling, and Omic Approaches*, 497–520.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815794-7.00018-7>

Zug, K. L. M., Huamaní Yupanqui, H. A., Meyberg, F., Cierjacks, J. S., & Cierjacks, A. (2019). Cadmium Accumulation in Peruvian Cacao (*Theobroma cacao* L.) and Opportunities for Mitigation. *Water, Air, and Soil Pollution*, 230(3), 1–18.
<https://doi.org/10.1007/S11270-019-4109-X/FIGURES/4>

	MACROPROCESO DE APOYO	CÓDIGO: AAAR113
	PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO	VERSIÓN: 6
	DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL	VIGENCIA: 2021-09-14
		PAGINA: 8 de 13

RESUMEN DEL CONTENIDO EN ESPAÑOL E INGLÉS

(Máximo 250 palabras – 1530 caracteres, aplica para resumen en español):

RESUMEN

Este documento expone las diferentes alternativas investigadas en la actualidad sobre el uso de microorganismos del suelo con capacidad biorremediadora del cadmio y su potencial uso en el cultivo de cacao, puesto que la presencia de metales pesados como el cadmio colocan en riesgo la salud humana, disminuyendo la confiabilidad y la calidad del cacao, dificultando su comercialización a nivel internacional, debido a que algunos países importadores del grano o sus transformados acogieron la resolución No. 1323 de 2021 emitida por la Unión Europea, la cual reglamenta los niveles máximos admitidos de cadmio en distintos productos a base de cacao. Por este motivo, es importante conocer las fuentes de contaminación de Cd, estrategias de biorremediación no convencionales a través del uso de bacterias resistentes al cadmio (CdtB) y hongos del suelo. El objetivo de este documento es describir la investigación actual sobre los microorganismos rizosféricos y su capacidad biorremediadora de cadmio en el cultivo de cacao (*Theobroma cacao*), detallando los mecanismos bioquímicos que las bacterias usan para inmovilizar o neutraliza el Cd del suelo como biosorción, quimisorción, bioacumulación, biometeorización, entre otros, además de, las rutas metabólicas usadas en la superficie bacteriana, así como indagar si existe una actividad benéfica de los hongos formadores de micorrizas arbusculares en la disminución de Cd en plantas de cacao.

ABSTRACT

This document exposes the different alternatives currently investigated on the use of soil microorganisms with cadmium bioremediation capacity and their potential use in cocoa cultivation, since the presence of heavy metals such as cadmium puts human health at risk, decreasing the reliability and quality of cocoa, making it difficult to market it internationally, due to the fact that some countries that import the grain or its processed products have accepted resolution No. 1323 of 2021 issued by the European Union, which regulates the maximum levels of cadmium allowed in various cocoa-based products. For this reason, it is important to know the sources of Cd contamination, unconventional bioremediation strategies through the use of cadmium-resistant bacteria (CdtB) and soil fungi. The objective of this document is to describe the current research on rhizospheric microorganisms and their cadmium bioremediation capacity in cocoa (*Theobroma cacao*) crops, detailing the biochemical mechanisms that bacteria use to immobilize or neutralize soil Cd such as biosorption, chemisorption, bioaccumulation, bioweathering, among others, in addition to the metabolic pathways used on the bacterial surface, as well as investigating whether there is a beneficial activity of arbuscular mycorrhizal fungi in reducing Cd in cocoa plants.

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

Por medio del presente escrito autorizo (Autorizamos) a la Universidad de Cundinamarca para que, en desarrollo de la presente licencia de uso parcial, pueda ejercer sobre mí (nuestra) obra las atribuciones que se indican a continuación,

Diagonal 18 No. 20-29 Fusagasugá – Cundinamarca
Teléfono: (091) 8281483 Línea Gratuita: 018000180414
www.ucundinamarca.edu.co E-mail: info@ucundinamarca.edu.co
NIT: 890.680.062-2

*Documento controlado por el Sistema de Gestión de la Calidad
Asegúrese que corresponde a la última versión consultando el Portal Institucional*

	MACROPROCESO DE APOYO	CÓDIGO: AAAR113
	PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO	VERSIÓN: 6
	DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL	VIGENCIA: 2021-09-14
		PAGINA: 9 de 13

teniendo en cuenta que, en cualquier caso, la finalidad perseguida será facilitar, difundir y promover el aprendizaje, la enseñanza y la investigación.

En consecuencia, las atribuciones de usos temporales y parciales que por virtud de la presente licencia se autoriza a la Universidad de Cundinamarca, a los usuarios de la Biblioteca de la Universidad; así como a los usuarios de las redes, bases de datos y demás sitios web con los que la Universidad tenga perfeccionado una alianza, son: Marque con una "X":

AUTORIZO (AUTORIZAMOS)	SI	NO
1. La reproducción por cualquier formato conocido o por conocer.	X	
2. La comunicación pública, masiva por cualquier procedimiento o medio físico, electrónico y digital.	X	
3. La inclusión en bases de datos y en sitios web sean éstos onerosos o gratuitos, existiendo con ellos previa alianza perfeccionada con la Universidad de Cundinamarca para efectos de satisfacer los fines previstos. En este evento, tales sitios y sus usuarios tendrán las mismas facultades que las aquí concedidas con las mismas limitaciones y condiciones.	X	
4. La inclusión en el Repositorio Institucional.	X	

De acuerdo con la naturaleza del uso concedido, la presente licencia parcial se otorga a título gratuito por el máximo tiempo legal colombiano, con el propósito de que en dicho lapso mi (nuestra) obra sea explotada en las condiciones aquí estipuladas y para los fines indicados, respetando siempre la titularidad de los derechos patrimoniales y morales correspondientes, de acuerdo con los usos honrados, de manera proporcional y justificada a la finalidad perseguida, sin ánimo de lucro ni de comercialización.

Para el caso de las Tesis, Trabajo de Grado o Pasantía, de manera complementaria, garantizo(garantizamos) en mi(nuestra) calidad de estudiante(s) y por ende autor(es) exclusivo(s), que la Tesis, Trabajo de Grado o Pasantía en cuestión, es producto de mi(nuestra) plena autoría, de mi(nuestro) esfuerzo personal intelectual, como consecuencia de mi(nuestra) creación original particular y, por tanto, soy(somos) el(los) único(s) titular(es) de la misma. Además, aseguro (aseguramos) que no contiene citas, ni transcripciones de otras obras protegidas, por fuera de los límites autorizados por la ley, según los usos honrados, y en proporción a los fines previstos; ni tampoco contempla declaraciones difamatorias contra terceros; respetando el derecho a la imagen, intimidad, buen nombre y demás derechos constitucionales. Adicionalmente, manifiesto (manifestamos) que no se incluyeron expresiones contrarias al orden público ni a las buenas costumbres. En consecuencia, la responsabilidad directa en la elaboración, presentación, investigación y, en general,

	MACROPROCESO DE APOYO	CÓDIGO: AAAR113
	PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO	VERSIÓN: 6
	DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL	VIGENCIA: 2021-09-14
		PAGINA: 10 de 13

contenidos de la Tesis o Trabajo de Grado es de mí (nuestra) competencia exclusiva, eximiendo de toda responsabilidad a la Universidad de Cundinamarca por tales aspectos.

Sin perjuicio de los usos y atribuciones otorgadas en virtud de este documento, continuaré (continuaremos) conservando los correspondientes derechos patrimoniales sin modificación o restricción alguna, puesto que, de acuerdo con la legislación colombiana aplicable, el presente es un acuerdo jurídico que en ningún caso conlleva la enajenación de los derechos patrimoniales derivados del régimen del Derecho de Autor.

De conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, “*Los derechos morales sobre el trabajo son propiedad de los autores*”, los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables. En consecuencia, la Universidad de Cundinamarca está en la obligación de RESPETARLOS Y HACERLOS RESPETAR, para lo cual tomará las medidas correspondientes para garantizar su observancia.

NOTA: (Para Tesis, Trabajo de Grado o Pasantía):

Información Confidencial:

Esta Tesis, Trabajo de Grado o Pasantía, contiene información privilegiada, estratégica, secreta, confidencial y demás similar, o hace parte de la investigación que se adelanta y cuyos resultados finales no se han publicado.

SI ___ NO X.

En caso afirmativo expresamente indicaré (indicaremos) en carta adjunta, expedida por la entidad respectiva, la cual informa sobre tal situación, lo anterior con el fin de que se mantenga la restricción de acceso.

LICENCIA DE PUBLICACIÓN

Como titular(es) del derecho de autor, confiero(erimos) a la Universidad de Cundinamarca una licencia no exclusiva, limitada y gratuita sobre la obra que se integrará en el Repositorio Institucional, que se ajusta a las siguientes características:

a) Estará vigente a partir de la fecha de inclusión en el repositorio, por un plazo de 5 años, que serán prorrogables indefinidamente por el tiempo que dure el derecho patrimonial del autor. El autor podrá dar por terminada la licencia solicitándolo a la Universidad por escrito. (Para el caso de los Recursos Educativos Digitales, la Licencia de Publicación será permanente).

 UDEC UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA	MACROPROCESO DE APOYO	CÓDIGO: AAAR113
	PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO	VERSIÓN: 6
	DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL	VIGENCIA: 2021-09-14
		PAGINA: 11 de 13

b) Autoriza a la Universidad de Cundinamarca a publicar la obra en formato y/o soporte digital, conociendo que, dado que se publica en Internet, por este hecho circula con un alcance mundial.

c) Los titulares aceptan que la autorización se hace a título gratuito, por lo tanto, renuncian a recibir beneficio alguno por la publicación, distribución, comunicación pública y cualquier otro uso que se haga en los términos de la presente licencia y de la licencia de uso con que se publica.

d) El(Los) Autor(es), garantizo(amos) que el documento en cuestión es producto de mi(nuestra) plena autoría, de mi(nuestro) esfuerzo personal intelectual, como consecuencia de mi (nuestra) creación original particular y, por tanto, soy(somos) el(los) único(s) titular(es) de la misma. Además, aseguro(aseguramos) que no contiene citas, ni transcripciones de otras obras protegidas, por fuera de los límites autorizados por la ley, según los usos honrados, y en proporción a los fines previstos; ni tampoco contempla declaraciones difamatorias contra terceros; respetando el derecho a la imagen, intimidad, buen nombre y demás derechos constitucionales. Adicionalmente, manifiesto (manifestamos) que no se incluyeron expresiones contrarias al orden público ni a las buenas costumbres. En consecuencia, la responsabilidad directa en la elaboración, presentación, investigación y, en general, contenidos es de mí (nuestro) competencia exclusiva, eximiendo de toda responsabilidad a la Universidad de Cundinamarca por tales aspectos.

e) En todo caso la Universidad de Cundinamarca se compromete a indicar siempre la autoría incluyendo el nombre del autor y la fecha de publicación.

f) Los titulares autorizan a la Universidad para incluir la obra en los índices y buscadores que estimen necesarios para promover su difusión.

g) Los titulares aceptan que la Universidad de Cundinamarca pueda convertir el documento a cualquier medio o formato para propósitos de preservación digital.

h) Los titulares autorizan que la obra sea puesta a disposición del público en los términos autorizados en los literales anteriores bajo los límites definidos por la universidad en el "Manual del Repositorio Institucional AAAM003"

i) Para el caso de los Recursos Educativos Digitales producidos por la Oficina de Educación Virtual, sus contenidos de publicación se rigen bajo la Licencia Creative Commons: Atribución- No comercial- Compartir Igual.



j) Para el caso de los Artículos Científicos y Revistas, sus contenidos se rigen bajo la Licencia Creative Commons Atribución- No comercial- Sin derivar.

 UDECA UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA	MACROPROCESO DE APOYO	CÓDIGO: AAAR113
	PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO	VERSIÓN: 6
	DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL	VIGENCIA: 2021-09-14
		PAGINA: 12 de 13



Nota:

Si el documento se basa en un trabajo que ha sido patrocinado o apoyado por una entidad, con excepción de Universidad de Cundinamarca, los autores garantizan que se ha cumplido con los derechos y obligaciones requeridos por el respectivo contrato o acuerdo.

La obra que se integrará en el Repositorio Institucional está en el(los) siguiente(s) archivo(s).

Nombre completo del Archivo Incluida su Extensión (Ej. Nombre completo del proyecto.pdf)	Tipo de documento (ej. Texto, imagen, video, etc.)
1.Formato repositorio Liuba Cubillos.pdf	Texto (pdf)
2.	
3.	
4.	

En constancia de lo anterior, Firmo (amos) el presente documento:

APELLIDOS Y NOMBRES COMPLETOS	FIRMA (autógrafo)
Cubillos Rodríguez Liuba Esperanza	

21.1-51-20.

Universidad de Cundinamarca
Sede Fusagasugá



Facultad de Ciencias Agropecuarias

**MICROORGANISMOS RIZOSFÉRICOS Y SU CAPACIDAD BIORREMEDIADORA
DE CADMIO EN EL CULTIVO DE CACAO (*Theobroma cacao*) – UNA REVISIÓN**

**LIUBA ESPERANZA CUBILLOS RODRÍGUEZ
CÓDIGO: 160 218 113**

**UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS
INGENIERIA AGRONÓMICA
FUSAGASUGÁ
2022**

**MICROORGANISMOS RIZOSFÉRICOS Y SU CAPACIDAD BIORREMEDIADORA
DE CADMIO EN EL CULTIVO DE CACAO (*Theobroma cacao*) – UNA REVISIÓN**

**LIUBA ESPERANZA CUBILLOS RODRÍGUEZ
CÓDIGO: 160 218 113**

**Trabajo de grado (MONOGRAFIA)
Presentado como requisito para obtener el título de
INGENIERO AGRONOMO**

**Director:
KAROL LIZARAZO HERNÁNDEZ
I.A. M.Sc**

**UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS
INGENIERIA AGRONOMICA
FUSAGASUGA
2022**

Nota de Aceptación

Presidente del Jurado

Jurado

Jurado

DEDICATORIA

A mis padres, mi hermano, mi abuela y todos aquellos familiares que llevo en el corazón y ya no están en este plano, pues son parte de este gran logro. A través de, sus compañía, consejos y apoyo me han llevado a ser la persona que soy hoy día, pues han contribuido de manera especial con el logro de mis metas.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios y la vida, por haberme brindado todas las capacidades para culminar esta carrera y guiarme por el mejor sendero.

Agradezco a mis padres y mi hermano por brindarme su amor y su apoyo valioso e incondicional, al encaminar mi vida hacia grandes propósitos personales y profesionales.

Agradezco a Edwin Escobar y su madre, por el gran cariño y especial afecto brindado en esta etapa de mi vida.

Agradezco a mi director Karol Lizarazo, por su ayuda, acompañamiento y conocimiento brindado, al ser un gran guía para el desarrollo de este proyecto.

Al grupo de investigación Agrobiología tropical – ABT, por haberme permitido hacer parte de su grupo, reconociendo su trabajo como un gran fomento del conocimiento y la formación de profesionales integrales y proactivos.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	7
INTRODUCCIÓN.....	8
OBJETIVOS	10
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	11
METODOLOGÍA	13
JUSTIFICACIÓN	14
CAPÍTULO I	15
1. PROBLEMÁTICA DEL CACAO COMO PLANTA HIPERBIOACUMULADORA DE CADMIO.....	15
1.1. FUENTES DE CADMIO EN SUELOS DE USO AGRÍCOLA.....	16
1.2. FACTORES QUE INFLUYEN SOBRE LA BIODISPONIBILIDAD DEL CADMIO EN EL SUELO	17
1.3. CONCENTRACIÓN DE CADMIO EN DIFERENTES ZONAS PRODUCTORAS A NIVEL MUNDIAL	19
1.4. CAMBIOS FISIOLÓGICOS Y BIOQUÍMICOS INDUCIDOS POR LA TOXICIDAD DEL CADMIO EN PLANTAS DE CACAO	20
CAPÍTULO II	21
2. LA BIORREMEDIACIÓN COMO UNA ALTERNATIVA DE MITIGACIÓN DEL CADMIO: ENFOCADO A BACTERIAS CdtB.....	21
2.1.1. Biosorción	22
2.1.2. Biolixiviación.....	23
2.1.3. Biotransformación.....	25
2.1.4. Biodegradación	26
2.1.5. Biomineralización (biometeorización)	27
2.1.6. Quimisorción.....	28
2.1.7. Bioacumulación.....	29
CAPÍTULO 3	29
3. EFECTO DE HONGOS FORMADORES DE MICORRIZAS ARBUSCULARES (HFMA) EN SUELOS CACAOTEROS CONTAMINADOS CON CADMIO.....	29
3.1. HFMA REPORTADOS COMO INMOVILIZADORES DEL CADMIO EN SUELOS DE USO AGRÍCOLA	31
3.2. ESTUDIOS REALIZADOS EN CACAO: EFECTOS DE HFMA EN LA INMOVILIZACIÓN DEL CADMIO	32
CONCLUSIONES.....	34
RECOMENDACIONES	35
REFERENCIAS.....	36

RESUMEN

Este documento expone las diferentes alternativas investigadas en la actualidad sobre el uso de microorganismos del suelo con capacidad biorremediadora del cadmio y su potencial uso en el cultivo de cacao, puesto que la presencia de metales pesados como el cadmio colocan en riesgo la salud humana, disminuyendo la confiabilidad y la calidad del cacao, dificultando su comercialización a nivel internacional, debido a que algunos países importadores del grano o sus transformados acogieron la resolución No. 1323 de 2021 emitida por la Unión Europea, la cual reglamenta los niveles máximos admitidos de cadmio en distintos productos a base de cacao. Por este motivo, es importante conocer las fuentes de contaminación de Cd, estrategias de biorremediación no convencionales a través del uso de bacterias resistentes al cadmio (CdtB) y hongos del suelo. El objetivo de este documento es describir la investigación actual sobre los microorganismos rizosféricos y su capacidad biorremediadora de cadmio en el cultivo de cacao (*Theobroma cacao*), detallando los mecanismos bioquímicos que las bacterias usan para inmovilizar o neutraliza el Cd del suelo como biosorción, quimisorción, bioacumulación, biometeorización, entre otros, además de, las rutas metabólicas usadas en la superficie bacteriana, así como indagar si existe una actividad benéfica de los hongos formadores de micorrizas arbusculares en la disminución de Cd en plantas de cacao.

INTRODUCCIÓN

El cacao (*Theobroma cacao*) es una planta perteneciente a la familia Malvaceae, originaria de la selva amazónica de América Latina (Doaré et al., 2020), considerado un árbol económicamente importante para varios países tropicales, incluso desde tiempos precolombinos, pues su semilla es considerada un alimento de alto valor nutritivo y es usada como materia prima de diversos productos alimenticios, farmacéuticos y cosméticos.

Existe una tendencia mundial al aumento del consumo de chocolate, proveniente de cacao fino de sabor y aroma, el cual es valorado y apetecido por los mercados internacionales, pues el cacao de América Latina es un cultivo tradicional arraigado a la cultura de cada país donde se produce, contando con el apoyo de los gobiernos locales para la creación de tecnologías que incrementan la producción de sus cultivos. Sin embargo, existen diferentes problemas que dificultan la producción y disminuyen la calidad del cacao, como la presencia de metales pesados en los suelos cultivados, la falta de normas para evitar prácticas que inciden en los altos contenidos del cadmio y la falta de recursos económicos para desarrollar las investigaciones relacionadas a la problemática. El desconocimiento de productores sobre la problemática, así como, las prácticas de prevención y mitigación, también representan una limitante, además, no hay estrategias concertadas para llegar a ellos y compartir los avances científicos actuales que se pueden usar para disminuir los niveles de cadmio en las semillas de cacao (Wuellins et al., 2019).

En estudios recientes se ha encontrado que existen diferentes tipos de estrategias de biorremediación del cadmio que pueden llegar a ser útiles, sin embargo, aún son objeto de ensayos, un ejemplo es el uso de bacterias productoras de exopolisacáridos (EPS), quienes integran a estos biopolímeros el cadmio gracias a la diferencia de cargas, por otra parte, en otros estudios también se ha logrado encontrar bacterias

Facultad de Ciencias Agropecuarias

oxalotróficas tolerantes al cadmio, quienes lo logran transformar en minerales estables como la otavita, que no pueden ingresar a la planta (Canchignia et al., 2021).

En este contexto, el objetivo de esta monografía es recopilar avances en investigaciones realizadas sobre las estrategias de biorremediación del cadmio, a través de microorganismos con esta facultad, e indagar las causas asociadas a la bioacumulación de cadmio en plantas y granos de cacao.

OBJETIVOS

Objetivo general

Describir la investigación actual sobre los microorganismos rizosféricos y su capacidad biorremediadora de cadmio en el cultivo de cacao (*Theobroma cacao*).

Objetivos específicos

- Recopilar investigaciones realizadas en la actualidad sobre el uso de microorganismos biorremediadores del cadmio con un enfoque en América Latina.
- Indagar mecanismos de biorremediación usados en campo, su aplicabilidad, su efectividad y su impacto en el medio ambiente.
- Comparar resultados obtenidos en investigaciones realizadas con el uso de bacterias y hongos resistentes al cadmio en la biorremediación del cadmio.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La absorción de metales pesados, en especial de cadmio por plantas de cacao era un problema poco conocido e investigado, sin embargo, en los últimos años ha sido el foco de estudio, debido a la imposición por la Unión Europea de límites máximos para la comercialización de esta materia prima. Esto, debido a problemas de salud reportados y relacionados a intoxicación por Cd, ya que dado a la bioacumulación de este metal en los órganos o tejidos especialmente en pulmón, hígado, riñón y huesos del cuerpo humano, a través, del consumo de alimentos contaminados o con altos niveles de cadmio (por ejemplo transformados de cacao), se presentan alteraciones enzimáticas, neurológicas, renales, respiratorias y digestivas, que pueden conllevar a bronquitis, infertilidad, carcinogénesis, hipertensión arterial y enfermedades vasculares (C. P. Bravo, 2020).

Por este motivo, la comunidad científica ha tomado conciencia del caso y se ha dispuesto a buscar medidas de prevención y control que permitan proveer de materias primas alimentarias con niveles bajos, aceptables y seguros de cadmio, los cuales han sido reglamentados por la Unión Europea a través de la resolución No 1323 de 2021, en donde exponen los niveles máximos permitidos para cadmio en ciertos alimentos, incluidos los productos de chocolate, aclarando que, el contenido de cadmio varía según el contenido de cacao en el producto, motivo por el cual se han establecido diferentes niveles máximos dependiendo el producto, por ejemplo, chocolate de leche < 30% (0.1 mg/kg de Cd), chocolate oscuro < 50 % y chocolate de leche ≥ 30 % (0.3 mg/kg de Cd), chocolate oscuro ≥ 50 % (0.8 mg/kg de Cd), y chocolate en polvo (0.6 mg/kg de Cd) (Comisi et al., 2011).

A pesar de esto, y en lo que se refiere a Colombia, específicamente en el departamento de Santander, reconocido por su alta producción de cacao, se han encontrado niveles máximos de cadmio completamente fuera de los rangos

Facultad de Ciencias Agropecuarias

establecidos en la norma, y los cuales oscilan entre los 4 a 7 mg/kg de cadmio en granos (Guerra Cierra et al., 2018).

Por lo anterior, se evidencia que las concentraciones de cadmio en productos derivados del cacao son una limitante tanto para la salud humana como para su comercialización en mercados internacionales, lo cual afecta la economía de las familias cacaocultoras en los diferentes países de América Latina, y es necesario establecer estrategias claras que se puedan adoptar en los cultivos para prevenir y disminuir los altos contenidos de Cadmio en granos.

Preguntas de investigación

- ¿Cuál es el enfoque actual de la investigación sobre la biorremediación del cadmio en el cultivo de cacao en Colombia y el mundo?
- ¿Qué tipo de microorganismos están siendo investigados por su facultad biorremediadora del cadmio en suelos cacaoteros?
- ¿Son consideradas las bacterias organismos potenciales para la biorremediación efectiva del cadmio en el cultivo de cacao?

METODOLOGÍA

La metodología se dividió en tres fases, que facilitaron una revisión sistemática integral y ordenada, a continuación, se describe cada una de ellas.

1. **Recolección sistemática de material bibliográfico:** se realizó con base en varias fuentes documentales virtuales, como editoriales y varias bases de datos adscritas a centros de investigación específico o de orden común, además de buscadores genéricos. Donde se destaca el uso de la E-Biblioteca Virtual de la Universidad de Cundinamarca, de donde se utilizó las revistas Scopus, Springer y Science Direct. Por otro lado, también destaca la BAC (Biblioteca Agropecuaria de Colombia) la cual es posible encontrar en la página web de Agrosavia. Por último, es relevante mencionar que las palabras claves con que se realizó la búsqueda fueron cacao, cadmio y biorremediación.
2. **Compilación y Selección:** se encontraron 65 artículos de los cuales se eligieron 57 artículos, descartando por fecha de publicación la cual no debe ser mayor de 5 años, así como por la coherencia del tema y el uso específico de microorganismos rizosféricos.
3. **Elaboración de estado del arte:** se realizó el escrito basado en los artículos elegidos, dividiendo la temática en tres capítulos diferentes, que abordaron de manera integral la problemática, las fuentes de cadmio en el suelo, los factores influyentes y los diferentes tipos de biorremediación con un enfoque en el cultivo de cacao.

JUSTIFICACIÓN

En la actualidad existen varios métodos tanto biológicos como químicos que promueven la mitigación del cadmio en el suelo, sin embargo, aquellos métodos convencionales que conllevan el uso de enmiendas orgánicas como turba leñosa, nitrato de hierro, hierro cerivalente, biocarbón, cal, aplicación foliar de sílice o selenio, compuestos inorgánicos (fósforo y zinc), zeolitas y fósforo+calcio (Maddela et al., 2020), pueden ser un arma de doble filo, pues aunque se han reportado resultados significativos en la disminución de la biodisponibilidad del cadmio en el suelo, su aplicación por sí sola no disminuye la concentración del cadmio en hojas o semillas, y pueden llegar a constituir una fuente de contaminación, pues estas técnicas pueden producir efectos secundarios al aumentar la movilidad de los metales y cambiar las propiedades físico-químicas del suelo, sumado a técnicas de lavado de suelos ácidos y el “enterrado” de suelos. Hay que tener en cuenta que las enmiendas con compuestos inorgánicos u orgánicos pueden causar muchos cambios en los microambientes del suelo, que incluyen especies reactivas de oxígeno (ROS), estrés oxidativo y peroxidación de lípidos en las membranas celulares (Maddela et al., 2020). Por tal motivo, vale la pena indagar si existen otros mecanismos efectivos en la disminución del cadmio en el cultivo o postcosecha del cacao. Una de estas estrategias es la biorremediación, que es el uso de organismos vivos como bacterias u hongos resistentes al cadmio, que gracias a sus capacidades metabólicas retiran este metal de la fracción soluble del suelo y lo transforman en diferentes compuestos estables e insolubles que tardan mucho tiempo en desintegrarse, fijándolo de esta manera al suelo, es así como el uso de microorganismos tiene un menor impacto en el medio ambiente, además de que podría tener un menor costo.

CAPÍTULO I

1. PROBLEMÁTICA DEL CACAO COMO PLANTA HIPERBIOACUMULADORA DE CADMIO

El cadmio es un metal pesado que se encuentra de forma natural en los suelos, este puede ser absorbido por diferentes especies de plantas que naturalmente tienen la facultad de bioacumularlo, como es el caso del cacao (*Theobroma cacao*), quien lo acumula principalmente en hojas y semillas. Sin embargo, esto representa un serio problema, el cual compromete la salud humana, el medio ambiente y la seguridad alimentaria (Chancay Alcívar et al., 2022), pues el Cadmio ha sido catalogado por la UE, la Agencia Internacional de Investigación sobre el Cáncer (IARC) y la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA) como un metal cancerígeno de Categoría 1B, Grupo 1 y Clase B, respectivamente (Maddela et al., 2020).

Las semillas o “almendras” de cacao son usadas como materia prima para la elaboración de productos cosméticos, farmacéuticos y principalmente en la elaboración de productos alimenticios. Por lo anterior, se corre el riesgo de que este metal pesado ingrese en la cadena trófica, donde se bioacumula en plantas, animales y medio ambiente, pudiendo llegar a causar problemas serios en la salud humana, puesto que nos encontramos expuestos al cadmio a través del aire, el agua, los suelos contaminados, el tabaco, y la dieta, la cual es la principal fuente de exposición para los no fumadores (Sanchez, 2016). Durante los últimos años, y en vista de los preocupantes efectos secundarios que pueda tener la acumulación de cadmio en el cuerpo humano, organizaciones internacionales se han puesto en la tarea de regularizar los contenidos de cadmio en los alimentos, emitiendo la resolución 1323 de 2021 de la unión europea, mediante la cual se establecen los límites máximos admitidos de cadmio para distintos productos dentro de ellos los derivados del cacao.

Dentro de las prácticas culturales de algunas zonas cacaocultoras de Latinoamérica, se ha hecho común el lavado de suelos ácidos, el encalado, y el enterrado de los

Facultad de Ciencias Agropecuarias

suelos con el fin de mitigar la problemática. Sin embargo, se ha reportado que estas prácticas alteran las propiedades físico químicas, así como la microfauna del suelo, por esta razón, dentro la búsqueda de soluciones estratégicas y amigables con el medio ambiente se ha encontrado que la biorremediación es una buena alternativa para enfrentar este problema, puesto que, los microorganismos tienen un menor impacto al medio ambiente y podrían ser estrategias más económicas (Canchignia et al., 2021)

1.1. FUENTES DE CADMIO EN SUELOS DE USO AGRÍCOLA

El cadmio se encuentra naturalmente en el suelo, sus concentraciones normales se encuentran en un rango de 0,7 a 1,1 mg/kg, y en la fracción soluble tiene concentraciones menores que varían de los 0,2-6 µg/L, sin embargo, existen diferentes fuentes de contaminación que pueden elevar sus concentraciones, cabe resaltar que un suelo se considera contaminado cuando sus concentraciones en la fracción soluble se encuentran entre 300-400 µg/L (Sanchez, 2016).

En la agricultura, los fertilizantes fosfatados se consideran la mayor fuente de cadmio en el suelo, sin embargo, la concentración de cadmio en estos depende de la procedencia de las rocas mediante las cuales se elaboran, a pesar de esto, diferentes países ya han puesto en marcha proyectos y han emitido leyes que limitan a 60 mg de Cd/kg de P₂O₅ las concentraciones de Cd en los fertilizantes, mientras que otros países han sido más estrictos y han limitado a 20 mg de Cd/kg de P₂O₅ como la concentración máxima permitida para la comercialización de fertilizantes fosfatados, e incluso el parlamento europeo ha propuesto crear una etiqueta verde para identificar aquellos insumos fertilizantes que contengan menos de 5 ppm de cadmio, arsénico, plomo, cromo hexavalente y mercurio (*Cadmio, Este Asesino Silencioso, Escondido En Fertilizantes Con Fosfatos - Red de Desarrollo Sostenible de Colombia, n.d.*).

Facultad de Ciencias Agropecuarias

Existen otras fuentes de contaminación de Cd no menos importantes, como lo son pigmentos, pinturas, baterías, materiales de PVC, aleaciones metálicas, minería y combustión de carburantes (Nieves et al., 2019).

Cabe resaltar que los desechos del cultivo como cáscaras y en especial hojas de cacao caídas pueden aumentar los niveles de Cd en el suelo, ya sea por lixiviación directa a la solución del suelo o por adsorción en la materia orgánica del suelo durante la descomposición y posteriormente bajar el pH del suelo que puede aumentar la fitodisponibilidad de Cd, por otro lado, las plantas también están expuestas al Cd en el aire que se deriva de la incineración de desechos y la combustión de combustibles fósiles y de donde se estima que la planta absorbe cerca del 40% del Cd acumulado en sus tejidos (Maddela et al., 2020).

1.2. FACTORES QUE INFLUYEN SOBRE LA BIODISPONIBILIDAD DEL CADMIO EN EL SUELO

Los principales factores que influyen directamente sobre la absorción de cadmio del suelo por plantas de cacao son el pH, la concentración de Cd del suelo, el genotipo del clon, la ubicación geográfica, factores agronómicos como los fertilizantes fosfatados y la interacción del Cd con otros minerales del suelo como el Zn (Oliveira et al., 2022).

El pH y la cantidad de materia orgánica del suelo son un factor clave, en suelos ácidos los sesquióxidos y la materia orgánica aumentan la solubilidad y movilidad del cadmio que se une fuertemente a esta, sumado a la alta afinidad del cadmio por oxihidróxidos de hierro y silicatos de aluminio como alófana e imogolita, por lo que en suelos de pH bajo el Cd es más disponible para las plantas, contrario a suelos alcalinos, donde el cadmio no es móvil y se precipita en forma de carbonatos y fosfatos insolubles, además se forman especies de hidroximonovalentes CdOH^+ que no pueden ocupar fácilmente los sitios de unión en el intercambio catiónico (Nieves et al., 2019). Esto significa claramente que el Cd de la planta no se relaciona con la concentración de Cd

Facultad de Ciencias Agropecuarias

total del suelo, por lo que, las concentraciones altas de Cd del suelo pueden conducir a una concentración baja de Cd en la planta y viceversa debido a las diferencias en la forma de Cd disponible para la planta según el pH del suelo; una disminución del pH de 1 unidad puede aumentar la solubilidad del Cd de 4 a 5 veces (Maddela et al., 2020), además, se estima que existen cerca de seis formas diferentes de cadmio que se forman dependiendo de la concentración de otros minerales o el pH del suelo (Cd soluble en agua, extraíble, unido a carbonato, unido a óxido de hierro o Mn, unido a materia orgánica o residual), por otro lado, es importante mencionar el orden de biodisponibilidad de algunos metales pesados como $Pb > Zn > Cd > Cu$, por lo cual el plomo tiene la mayor posibilidad de acumularse en el cacao, sin embargo algunos estudios muestran que se aloja en la cáscara de la almendra del grano, la cual se desecha en el proceso de postcosecha y transformación del grano seco de cacao (Aikpokpodion et al., 2012).

Por otro lado, la presencia de Cd y Zn en el suelo tiene efectos sinérgicos, elevadas concentraciones de Zn favorecen la movilidad e inhiben la retención del Cd y viceversa (Sanchez, 2016).

La concentración de Cd en el suelo y la ubicación geográfica es un factor igual de importante, ya que las concentraciones de Cd en la superficie del suelo normalmente varían entre 0,01 y 2,7 mg/kg, mientras que en suelos industriales contaminados o de origen volcánico se han informado niveles de hasta 10,5 mg/kg (Scaccabarozzi et al., 2020), como es el caso de gran parte de suelos tropicales de América del Sur, especialmente los suelos andesíticos de origen volcánico, razón por la cual, aunque el cacao suramericano sea de excelente calidad organoléptica, sus mercados se están cerrando, pues presentan concentraciones de cadmio superiores a las permitidas por la OMS y las políticas de regulación de diversos países europeos (Bertoldi et al., 2016).

El genotipo y la variabilidad genética es otro factor que determina la absorción de Cd por las plantas, pues clones pertenecientes incluso al mismo grupo genético, captan y absorben en mayores o menores cantidades el cadmio, lo que se ha atribuido a diferencias morfológicas, tales como el tamaño y la morfología de las raíces, los exudados de las raíces que quelan los iones metálicos, la asociación de las raíces con los microorganismos del suelo, el vigor genotípico, y la actividad de transportadores involucrados en la captación de iones metálicos en la superficie de la raíz (Grant et al., 2008).

1.3. CONCENTRACIÓN DE CADMIO EN DIFERENTES ZONAS PRODUCTORAS A NIVEL MUNDIAL

En un estudio donde se evaluó la huella multielemental y la trazabilidad geográfica de productos y granos secos de cacao de diferentes orígenes para distintos minerales y elementos contaminantes, se encontró que la concentración de Cd en los granos de América del Sur era casi tres veces mayor que en los

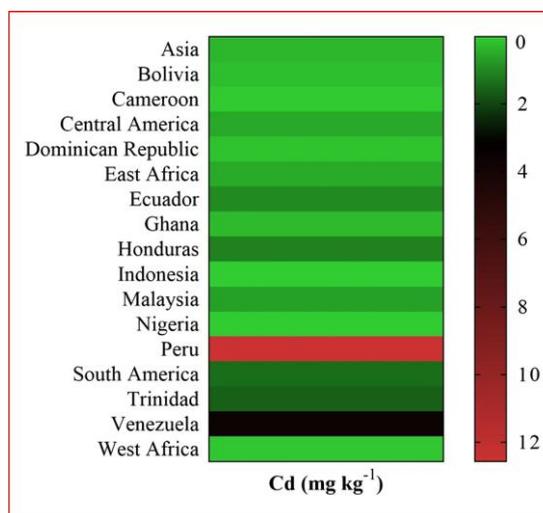


Figura 1. Concentración de cadmio en tejidos y granos secos de cacao en zonas productoras del mundo. Extraído de ⁸.

de América Central y África Oriental y diez veces mayor que la de África Occidental

(Bertoldi et al., 2016), lo cual se correlaciona con la figura 1, pues se ha encontrado que la concentración media de Cd (mg/kg) en América del Sur, África Oriental y América Central, Asia y África Occidental fue de 1,4, 0,5, 0,5, 0,3 y 0,09, respectivamente (Bertoldi et al., 2016), sin embargo, en algunas investigaciones se observó que la concentración de Cd en el cacao peruano (América del Sur) alcanzó hasta 12,56 mg/kg (Zug et al., 2019).

Vale la pena mencionar en una investigación realizada por (Agbeniyi et al., 2010) en Nigeria y diversos países de África occidental, los bajos niveles de Cd en el cacao se atribuyen a que entre el 70 % a 95% de los productores de cacao de estos países no utilizan fertilizantes en el cultivo, por lo que existe una fuerte evidencia de que el uso de fertilizantes fosfatados es el causante principal de la contaminación ambiental por metales pesados, como el Cd .

1.4. CAMBIOS FISIOLÓGICOS Y BIOQUÍMICOS INDUCIDOS POR LA TOXICIDAD DEL CADMIO EN PLANTAS DE CACAO

A nivel general, una vez dentro de la planta, el Cd acumulado en grandes cantidades conlleva a cambios morfológicos y ultraestructurales, y alteraciones en los procesos fisiológicos, bioquímicos y moleculares, modificando las actividades metabólicas de la planta. En las células vegetales el Cd induce la expresión génica diferencial originando una mayor actividad injustificada de enzimas antioxidantes, como peroxidasas de clase III y superóxido dismutasa (SOD) que deterioran los tejidos vegetales, además de la inducción de la producción de fitoquelatina (PC) las cuales quelan Cd y forman complejos con varios pesos moleculares, protegiendo así los efectos nocivos de los iones Cd libres y alojando estos compuestos en la vacuola (Sanchez, 2016).

En un estudio realizado en Brasil por (Castro et al., 2015) usando los híbridos CCN-10 × SCA-6 (híbrido obtenido a partir del cruce de SCA-6 originario de Perú y CCN-10 originario de Ecuador, ambos con alta tolerancia a diferentes tipos de estrés como sequía, salinidad, inundaciones y en especial enfermedades, sin embargo, con índice de grano bajo) y Catongo x Catongo híbrido Brasileño muy intolerante a estrés biótico y abiótico. En esta investigación se halló que cuando se sometía a CCN-10 × SCA-6 a altos niveles de Cd se observaba una alta actividad de GPX (guayacol peroxidasa) en las raíces, lo cual se interpreta como un mecanismo de defensa desarrollado por este híbrido para detoxificar rápidamente las células frente al exceso de especies reactivas

Facultad de Ciencias Agropecuarias

de oxígeno (ROS) producidas por estrés del Cd, o como mecanismos de defensa, como evitar la translocación de Cd a la parte aérea de la planta y evitar daños en orgánulos celulares responsables del metabolismo celular normal, a diferencia del Catongo x Catongo que solo tuvo la actividad de GPX en las hojas (la cual también la tuvo CCN-10 x SCA-6) y de forma tardía.

Por otro lado, también se observó que CCN-10 x SCA-6 tenía mayor producción de peroxidasas de clase III tanto en hojas como raíces, siendo un mecanismo de defensa desarrollado por CCN-10xSCA-6 y dirigido a eliminar el exceso de ROS producido por el estrés oxidativo provocado por la fitotoxicidad del Cd, lo cual también hace Catongo x Catongo pero en una mucho menos proporción (Castro et al., 2015).

En esta investigación también se observó que en presencia de altos contenidos de Cd, CCN-10xSCA-6 tenía una mayor producción de ARNm en células radicales relacionado con la biosíntesis de PCS (fitoquelatinas), un mecanismo importante para la desintoxicación de células estresadas por Cd, el aumento de la producción de ARNm para la biosíntesis de PCS puede considerarse una herramienta genética utilizada por las especies vegetales tolerantes para reducir los efectos fitotóxicos del Cd en las células, particularmente en las raíces, impidiendo así su translocación a las partes aéreas a través de la quelación de Cd y secuestro en las vacuolas de tal manera que la homeostasis celular se mantenga (Castro et al., 2015).

CAPÍTULO II

2. LA BIORREMEDIACIÓN COMO UNA ALTERNATIVA DE MITIGACIÓN DEL CADMIO: ENFOCADO A BACTERIAS CdtB

Bacterias y hongos resistentes al cadmio trabajan cooperativamente dentro de su naturaleza biológica, los primeros son encargados de la traslocación, y los segundos de la inmovilización del cadmio, motivo por el cual son vistos como una alternativa para la

Facultad de Ciencias Agropecuarias

mitigación del cadmio en el suelo, e inclusive algunos autores invitan a investigar consorcios microbianos, puesto que, las bacterias tolerantes al cadmio o CdtB (por sus siglas en inglés) pueden inmovilizar y transformar este metal pesado de la fracción soluble del suelo, minimizando su biodisponibilidad, evitando así su absorción y bioacumulación en las semillas de cacao; existen siete mecanismos metabólicos por los cuales las bacterias son capaces de disminuir el cadmio del suelo (Canchignia et al., 2021), a continuación se aborda cada uno.

2.1.1. Biosorción

Se refiere a la adherencia pasiva de iones de metales pesados (incluyendo el Cd) a la superficie de biomasa microbiana viva o muerta, gracias a la atracción electrostática entre los iones metálicos y los sitios de reacción cargados negativamente de la pared celular bacteriana que formarían exopolímeros de cadmio (EPS) no fitodisponibles, y lo que ha dado para diferentes investigaciones para la creación de bioadsorbentes biológicos de Cd, como la quitina y el quitosano (Ayangbenro & Babalola, 2017; Singh et al., 2020; D. Bravo & Braissant, 2022) o nanopartículas de CdS (Xu et al., 2021; D. Bravo & Braissant, 2022).

2.1.1.1. Bacterias CdtB reconocidas por su capacidad de biosorción de Cd

Las cepas *Microbacterium* sp. D2-2 y *Bacillus* sp. C9-3 han exhibido una capacidad considerable de biosorción de 222,22 y 163,96 mg de Cd²⁺ por gramo de biomasa a pH 5, gracias a los sitios de unión para cadmio en la pared celular bacteriana de CdtB (D. Bravo & Braissant, 2022), la cual ha sido foco de estudio dado a estos sitios de unión clave para el Cd, donde se ha encontrado que los exopolisacáridos extracelulares (EPS), también llamados sustancias poliméricas extracelulares de las paredes de las bacterias, son fundamentales en la formación de enlaces de Cd y su

Facultad de Ciencias Agropecuarias

secuestro en las células de la pared bacteriana, a través de, grupos funcionales sulfhidrilo, hidroxilo, carboxilo, carbonilo y amino (Long et al., 2021), para la formación de exopolímeros de Cd no fitodisponibles.

Sin embargo, para bacterias CdtB como *Pseudomonas putida*, *Shewenella oneidensis*, *Rhizobium tropici* y *Agrobacterium* sp, el porcentaje de Cd adherido depende directamente del pH del suelo, y solo llegan a un 100% de eficiencia en pH alcalinos de 9.7, 9.5, 10 y 11, lo cual es una gran limitante (Kenney & Fein, 2011; D. Bravo & Braissant, 2022).

Sin embargo, en otro estudio realizado por los mismos autores (Kenney & Fein, 2011), donde se evaluó la adsorción de cadmio usando CdtB acidófilas como *Acidiphilium cryptum* y *Acidiphilium acidophilum*, y CdtB alcalifílicas como *Bacillus pseudofirmus* y *Bacillus circulans*, se encontró que independientemente del pH del medio en que se encuentren, existe un comportamiento similar en la adsorción de protones y metales, lo que indica que la adsorción y formación de exopolisacáridos extracelulares de metales no disponibles para la planta puede ser posible en distintas condiciones de suelo.

2.1.2. Biolixiviación

La biolixiviación es uno de los mecanismos bacteriales más estudiados, pues es usado en la descontaminación económica y rentable en zonas mineras e industriales. La biolixiviación se refiere a la capacidad de las bacterias en disolver (Beltrán-Pineda & Gómez-Rodríguez, 2016) o solubilizar metales, a través, de ácidos orgánicos producidos por la bacteria, como ácido oxálico u oxalato, quienes actúan como ligandos quelantes, quien se une a los iones de cadmio formando el quelato oxalato de cadmio, por ejemplo (Krebs et al., 1997; Canchignia et al., 2021). Una vez biolixiviado el Cd, requiere un paso más, la floculación (aglutinamiento) del Cd con cloruro de polialuminio, quien neutraliza las cargas electrostáticas del Cd reduciendo las fuerzas

Facultad de Ciencias Agropecuarias

de repulsión y uniendo las partículas del Cd lixiviado entre sí, pues, el Cd es altamente fitodisponible y tiene alta movilidad después de la biolixiviación y permanece en la fracción soluble en ácido de los suelos contaminados, sin embargo con la floculación se aglutinaría y precipitaría (Bravo & Braissant, 2022).

2.1.2.1. Bacterias CdtB y hongos reconocidos por su capacidad de biolixiviación de Cd

Burkholderia sp. cepa Z-90 ha sido probada en suelos mineros contaminados, donde se ha destacado su potencial de biolixiviación del Cd, a través de, grupos carboxilo, donde se ha destacado bien en un pH de 5 y se ha tomado alrededor de 5 días en completar el proceso de lixiviación (Yang et al., 2018; Canchignia et al., 2021). Otras especies reconocidas por su capacidad biolixivadora son las SOB (bacterias oxidantes de azufre), con especies como *Acidithiobacillus* spp., *Acetobacter* spp., *Arthrobacter* spp. y *Pseudomonas* spp. Especies de hongos, tales como *Penicillium* spp., *Aspergillus* spp. y *Fusarium* spp, también se han destacado para la biolixiviación de Cd (Hou et al., 2020; Bravo & Braissant, 2022).

A pesar de esto *Burkholderia* sp. cepa Z-90 y otras bacterias CdtB como *Enterobacter* spp. o *Pseudomonas aeruginosa* y las dos especies de hongos ya mencionados, todavía no se han intentado utilizar en suelos agrícolas, pues, aunque bioremedien los metales pesados, se corre un alto riesgo al ser organismos patógenos de algunas especies cultivables (Bravo & Braissant, 2022), sin embargo, para estos casos, actualmente se está abordando la posibilidad de crear bacterias genéticamente modificadas, añadiendo genes funcionales relacionados a la inmovilización del cadmio, sin embargo, alteraría la naturaleza de poblaciones microbianas nativas debido a la transferencia horizontal del genes, lo que representa un problema (Bhayani et al., 2020; Bravo & Braissant, 2022).

2.1.3. Biotransformación

Se refiere a la capacidad de algunas bacterias para realizar la transformación de valencia o precipitación química extracelular, en donde, a través de reacciones enzimáticas reducen y transforman un compuesto soluble de cadmio en uno menos tóxico, menos soluble y por ende menos disponible para la planta (Canchignia et al., 2021), en este mecanismo nuevamente las células de la pared bacteriana producen exopolisacáridos extracelulares (ESP), donde en especial los ESP ricos en ácido urónico tienen alta capacidad de unión a moléculas de Cd (Abbas et al., 2017; Bravo & Braissant, 2022).

2.1.3.1. Bacterias CdtB reconocidas por su capacidad biotransformadora

En algunos estudios se ha encontrado que las bacterias reductoras de sulfato (SRB) pertenecientes al grupo de las CdtB, crean una biopelícula para protegerse del estrés por Cd a través de reacciones redox, transformando el cadmio en microesferas nanométricas de serpentinita (Bravo & Braissant, 2022; Covelo et al., 2007), otro de los mecanismos que tienen las SRB para biotransformar el cadmio es transformando el sulfato en sulfuro el cual reacciona con el cadmio disponible circundante produciendo CdS, o el sulfuro producido reacciona con el Cd disponible circundante para producir CdS que se encuentra en forma de greenockita o hawleyita (Castillo et al., 2012, Bravo & Braissant, 2022) o como impureza sustituyente de esfalerita o wurtzita, las cuales son minerales orgánicos muy estables en el tiempo e insolubles y que la planta no podrá absorber, este proceso también es conocido como biomineralización. Algunas bacterias CdtB con capacidad biotransformadora citadas en la literatura son en su mayoría SRB como *Beggiatoa* sp., *Desulfobacter* spp. y *Desulfobacterium* spp (Bravo & Braissant, 2022; Castillo et al., 2012).

2.1.4. Biodegradación

Se refiere a la capacidad de algunas bacterias CdtB de transformar compuestos orgánicos de cadmio como el quelato de oxalato de cadmio o el citrato de cadmio, en CO₂, H₂O y sales orgánicas que bien pueden ser menos tóxicas o incluso más tóxicas que la sustancia original. Sin embargo, los iones metálicos libres como Cd⁺ que resultan de esta biodegradación de quelatos pueden adherirse o absorberse en los minerales del suelo o precipitarse, siendo así la biodegradación un mecanismo también efectivo al inmovilizar este contaminante (Varjani et al., n.d.; Elsas, n.d.; Tabak et al., 2005; Canchignia et al., 2021).

Algunos estudios han demostrado que, en suelos contaminados con hidrocarburos, pero también con altas concentraciones de Cd, las CdtB tienen mayor capacidad de biodegradar desechos de minería como deca-bromo-difenil éter (BDE-209), gracias a una función metabólica de las CdtB en donde posiblemente se ve involucrado y beneficiado por altas concentraciones de Cd. Esto ha llevado a los investigadores a suponer que en suelos mineros con plantaciones de cacao cercanas en países como Colombia, Ecuador o Perú que estén contaminados con hidrocarburos pueda llegar a ser eficiente el uso de CdtB si las concentraciones de Cd en el suelo son mayores de 1 mg/kg de suelo, pues en este punto la degradación de hidrocarburos en el suelo se beneficia gracias a la alta concentración de Cd (Barraza et al., 2017; Bravo & Benavides, 2020; Bravo & Braissant, 2022).

2.1.4.1. Bacterias CdtB reconocidas por su capacidad biodegradadora

En cultivos de arroz de países principalmente asiáticos se ha reportado a *Acidithiobacillus ferrooxidans* y *Acidiphilium simbiótico*, en cultivos de espinaca se ha reportado a *Bacilo licheniformis*, por otro lado, en aguas residuales agrícolas se ha reportado a *Arthobacter viscoso* y *Bacilo laterosporus* (Abbas et al., 2017; Bravo &

Facultad de Ciencias Agropecuarias

Braissant, 2022), y en algunos suelos de pastos o sin ninguna actividad agrícola se han reportado *Actinomicetos*, *Enterococcus faecium* y *Estafilococo aureus* (Xiao et al., 2020; Bravo & Braissant, 2022).

2.1.5. Biomineralización (biometeorización)

Se refiere a la capacidad de CdtB para inmovilizar metales, a través de la precipitación extracelular, la biomineralización está casi siempre mediada por la actividad metabólica de microorganismos que inducen un cambio de ambiente de la capa superficial del suelo a través de la disolución de reocas y sustratos minerales, como por ejemplo, las bacterias ureolíticas, que hidrolizan la urea, a través de la producción de ureasa, esta reacción enzimática de hidrólisis causa que el pH del suelo aumente, momento en el que se producen carbonatos que se unen a los iones metálicos presentes en la fracción soluble del suelo, dentro de los que se encuentra el Cd^{+2} y precipitándolo de esta manera como otavita ($CdCO_3$) (Mishra, 2017; Kang et al., 2014; Bhattacharya et al., 2018; Qabany et al., 2012; Bravo & Braissant, 2022), el cual es un mineral estable en el tiempo, difícil de descomponerse y no está disponible para las plantas, de esta forma el Cd queda “secuestrado”, lo cual disminuiría en gran medida la acumulación de Cd en los granos de cacao al no poderse translocar a la planta. La biomineralización implica la conversión de una fuente soluble de Cd, como $CdCl_2$ o $CdNO_3$, en una forma menos o no soluble, como CdO , $Cd(OH)_2$, $CdCO_3$, $CdSO_4$ o $CdSe$, que son formas secundarias derivadas de la actividad metabólica bacteriana ya explicada (Bravo et al., 2018).

2.1.5.1. Bacterias CdtB reconocidas por su capacidad biomineralizadora

En la rizósfera de plantas de cacao se ha reportado a *Burkholderia* sp y *Enterobacter* sp. (Bravo et al., 2018; Bravo & Braissant, 2022), en la rizósfera de frijol caupí se ha

Facultad de Ciencias Agropecuarias

reportado a *Bacillus subtilis*, en la rizósfera de espinaca se ha reportado a *Bacillus licheniformis*, y en suelos sin actividad agrícola se ha reportado a *Pseudomonas aeruginosa*, *Acetobacter* spp., *Acidithiobacillus* spp., *Arthrobacter* spp., *Pseudomonas* spp. y Bacterias reductoras de sulfato (SRB) (Beveridge, 1989; Hou et al., 2020), (D. Bravo & Braissant, 2022).

2.1.6. Quimisorción

La quimisorción es similar a la biosorción, pero en este caso es un proceso activo, a través, de una reacción química, entre la superficie bacteriana y el metal pesado, como es el caso de las bacterias que usan el fosfato de hidrógeno como aceptor (compuesto que se enlaza recibiendo e⁻) del Cd⁺² y lo inmovilizan mediante micro-precipitaciones de hidrógeno-fosfato de cadmio (CdHPO₄) (Abbas et al., 2017; Khadivinia et al., 2014; Tabak et al., 2005; Bravo & Braissant, 2022). Este proceso se puede realizar, a través, de dos rutas metabólicas de exportación que se activan en presencia de Cd (a) usando el sistema de bomba Ptype ATPase que transporta el metal por hidrólisis de ATP en una reacción endotérmica demandante de energía, por otro lado está el mecanismo (b) usando una familia de proteínas de división celular de nodulación de resistencia (RND) - mecanismo transportador impulsado, que está involucrado en el tránsito de metales como el Cd donde no se obtiene energía a través de la hidrólisis de ATP para transportar el metal a la célula bacteriana (Shukla et al., 2019; Bravo & Braissant, 2022).

2.1.6.1. Bacterias CdtB reconocidas por su capacidad de quimisorción

En cultivos de arroz contaminados con Cd se ha reportado a *Bacilo cereus* RC-1 (Aryal, 2021; Bravo & Braissant, 2022), y en suelos sin actividad agrícola se ha

Facultad de Ciencias Agropecuarias

reportado a *Aquaspirillum* spp., *Leptothrix* sp., *Sphaerotilus* sp. Y *Esporosarcina urea* (Beveridge, 1989; Bravo & Braissant, 2022).

2.1.7. Bioacumulación

Se refiere a la capacidad de algunas CdtB de ingresar el metal pesado al citoplasma, a través de un proceso activo con gasto de energía, mediante la H⁺-ATPasa, donde es secuestrado por Metaloil-proteínas o Metalotioneína (MT) del grupo tiol o sulfhidrilos (-SH) formando complejos estables con el Cd y neutralizándolo (Marrero-Coto et al., 2010; Pócsi, 2011; Bravo & Braissant, 2022).

2.1.7.1. Bacterias CdtB y hongos reconocidos por su capacidad de bioacumulación

En cultivos de arroz contaminado, el cual, junto con la gran mayoría de cereales, también es reconocido por ser hiperbioacumulador de Cd, donde se ha reportado a *Aquaspirillum magnetotacticum*, *Cupriavidus taiwanensis*, *Delftia tsuruhatensis*, *Stenotrophomonas acidaminiphila* (Yasmeen et al., 2019; Bravo & Braissant, 2022). En cultivos de tomate se ha reportado a *Kluyvera ascorbata* SUD165 y SUD165/26 (Shukla et al., 2019; Bravo & Braissant, 2022), *Methylobacterium oryzae*; en cultivos de trigo se ha reportado a *Rhodobacter sphaeroides* (Yasmeen et al., 2019); en cultivos de mostaza india se ha reportado a *Variovorax paradoxico*; en cultivos de canola se ha reportado a *Pseudomonas tolaasii* RP23 (Shukla et al., 2019). En el caso de aguas residuales se ha encontrado actividad bioacumuladora de levaduras como *Saccharomyces cerevisiae* (Bravo & Braissant, 2022).

CAPÍTULO 3

3. EFECTO DE HONGOS FORMADORES DE MICORRIZAS ARBUSCULARES (HFMA) EN SUELOS CACAOTEROS CONTAMINADOS CON CADMIO

Facultad de Ciencias Agropecuarias

Los HFMA son hongos microscópicos del suelos asociados de forma mutualista con cerca del 80% de las plantas terrestres, colonizando el tejido intrarradical de la planta hospedera; estos pertenecen a la división Glomeromycota que incluyen nueve familias y 18 géneros, estos hongos sirven de complemento de la raíz en la toma de en especial de fósforo, estimula la tolerancia a condiciones de estrés abiótico como sequía, fluctuación de temperatura, salinidad y toxicidad por metales pesados (Valle et al., 2009; Rivera et al., 2014).

Los HFMA juegan un papel importante en la modulación de la toma de metales pesados por las plantas incrementando o disminuyendo la concentración acumulada en la planta dependiendo de la concentración y tipo de metal pesado, la especie de la planta y de HFMA. Cabe mencionar, la alta especificidad funcional en la simbiosis micorrízica, lo que lleva a variabilidad de respuestas observadas debido al genotipo del hongo, el genotipo de la planta y las condiciones experimentales o ambientales, que en conjunto influyen sobre la respuesta del hongo, lo que significa que el uso de organismos micorrícicos puede llegar a ser benéfico o no, por lo que se ha dicho en base a estudios realizados, que existe una probabilidad del 33% de que el hongo impida el paso del Cd a la raíz, un 33% de que el hongo permita el paso libre de Cd a la raíz, un 33% de efectos variables en la misma investigación y 1% de ausencia de efecto, éstas diferencias pueden explicarse debido a que los aislamientos de hongos usados, según la especie, son más o menos tolerantes al cadmio, por lo cual tiene un efecto diferente, por otro lado, la concentración del metal pesado en el suelo también es importante, pues su tasa de absorción por la planta, disminuye en concentraciones elevadas con respecto a plantas que no han sido inoculadas con hongos MA (Fernández y Rodríguez, 2019).

3.1. HFMA REPORTADOS COMO INMOVILIZADORES DEL CADMIO EN SUELOS DE USO AGRÍCOLA

Diversas investigaciones han llegado a resultados contradictorios o no correlacionados, pues es común como ya se describió, que diversos factores influyan sobre el efecto de los hongos micorrícicos y su papel en el biorremediación o inmovilización del Cd y otros metales pesados, pueden llegar a ser un arma de doble filo o no tener ningún efecto sobre la biorremediación de Cd en el suelo.

Por esta razón, las especies de HFMA que se citarán a continuación en la tabla 1. se han reportado con actividad biorremediadora en plantas específicas, pero es posible que, al cambiar de hospedero y ambiente natural, el hongo tenga otro efecto ya sea benéfico para la planta en el aspecto de la inmovilización del metal pesado o no, ya que puede llegar al contrario, a aumentar la traslocación de este a la planta.

Tabla 1. HFMA involucrados en la biorremediación del Cd en suelos de uso agrícola o con ninguna actividad.

Especie de Hongo MA biorremediador de Cd	Especie vegetal donde tiene actividad bioremediadora de Cd
<i>Funneliformis mosseae</i>	<i>Phaseolus vulgaris</i> y <i>Zea mays</i>
<i>Funneliformis geosporum</i>	<i>Aster tripolium</i>
<i>Funneliformis mosseae</i>	<i>Cannabis sativa</i>
<i>Acaulospora scrobiculata</i> <i>Paraglomus occultum</i> <i>Claroideoglopus etunicatum</i>	<i>Chloris gayana</i> , <i>Melinis minutiflora</i> , <i>Rhynchelytrum repens</i> , <i>Brachiaria brizantha</i> , <i>Pennisetum americanum</i> , <i>Sorghum sudanensis</i> , <i>Setaria anceps</i> , <i>Andropogon gayanus</i> y <i>Brassica sp.</i>
<i>Funneliformis mosseae</i> <i>Rhizophagus irregularis</i>	<i>Lolium multiflorum</i>
<i>Funneliformis mosseae</i>	<i>Zea mays</i> L.
<i>Rhizophagus irregularis</i>	<i>Nicotiana tabacum</i> natural y transgénico
<i>Funneliformis mosseae</i> <i>Claroideoglopus</i>	<i>Trifolium subterraneum</i>

<i>lamellosum</i>	
<i>Funneliformis mosseae</i>	<i>Trifolium L. repens</i>
Especie de Hongo MA biorremediador de Cd	Especie vegetal donde NO tiene actividad bioremediadora de Cd
<i>Rhizophagus irregularis</i>	<i>Agrostis capillaris</i>
MSND	<i>Medicago sativa</i>
<i>Rhizophagus irregularis</i> <i>Funneliformis mosseae</i>	<i>Helianthus annuus L.</i>
<i>Rhizophagus irregularis</i>	<i>Pisum sativum</i>
<i>Rhizophagus irregularis</i> <i>Funneliformis mosseae</i>	<i>Medicago truncatula</i>

Adaptado de (Fernández & Rodríguez, 2019)

3.2. ESTUDIOS REALIZADOS EN CACAO: EFECTOS DE HFMA EN LA INMOVILIZACIÓN DEL CADMIO

En cacao se han reportado estudios realizados en Trinidad y Tobago con las especies de HFMA en una especie fertilizante micorrícico a base de un consorcio de *Glomus intraradices*, *Glomus mosseae*, *Glomus aggregatum* y *Glomus etunicatum*, donde se encontró que las plantas de cacao tratadas con el biofertilizante micorrícico acumularon niveles significativamente más altos de Cd tanto en las hojas como en los tallos en comparación con plantas no tratadas y mencionan que esto puede deberse al que el micelio de las micorrizas, se esparce varios centímetros alrededor de las raíces de las plantas (Ramtahal et al., 2012).

Sin embargo, en contraste con lo anterior, se halló en un estudio que las HFMA si contribuyen a la biorremediación del Cd y brindan un servicio benéfico a la planta, sin embargo esta respuesta benéfica depende el genotipo de la planta así como del genotipo del HFMA, pues se sometieron a clones de cinco meses IMC67 y CAU43 ambos injertados con FSV41 a una concentración alta de Cd y Zn y se encontró que ambos materiales injertados acumulaban Cd mayormente en la copa independientemente del tratamiento con HFMA nativas y el producto comercial Safer micorrizas® y ninguno de los dos clones presentaron síntomas de clorosis o

Facultad de Ciencias Agropecuarias

reducciones en el máximo rendimiento cuántico del fotosistema II (Fv/Fm), sin embargo IMC67 incrementó con las micorrizas comerciales en un 24% su biomasa total y CAU 43 redujo en un 32% los niveles de Cd presentes en las hojas, lo que denota la interacción del genotipo del hospedero con los HFMA en el tipo de respuesta fisiológica del cacao en suelos enriquecidos con Cd y Zn(Felipe & Pineda, 2019).

En otros estudios realizados en Colombia se encontró que suelos con altas concentraciones de Cd y Zn genera un estrés que afecta de forma significativa las comunidades de HFMA, disminuyendo la abundancia, riqueza y diversidad de varias morfoespecies, sin embargo, aclaran que *Diversispora spurca*, *Rhizoglobus* sp. y *Claroideoglobus etunicatum*, fueron especies que toleraron altas concentraciones de Cd y Zn(Felipe & Pineda, 2019).

CONCLUSIONES

- Se encontró que, los principales factores que influyen sobre la disponibilidad de cadmio en el suelo son el pH, la concentración de Cd del suelo, el genotipo del clon, la ubicación geográfica, factores agronómicos como los fertilizantes fosfatados y la interacción del Cd con otros minerales del suelo como el Zn.
- Se confirmó que, el cacao de América del Sur tiene concentraciones de Cd casi tres veces mayor que los de América Central y África Oriental y diez veces mayor que los de África Occidental.
- Se puede decir que, la biorremediación bacteriana si es una alternativa que ha sido efectiva en cultivos agrícolas modelo como arroz, gracias a los diversos mecanismos bioquímicos de las bacterias tolerantes al cadmio CdtB.
- La Biomineralización resulta uno de los mecanismos bacterianos de biorremediación más eficientes al inmovilizar el Cd en minerales del suelo estables en el tiempo, algunas bacterias encontradas en la rizósfera de plantas de cacao que resaltan por su capacidad biomineralizadora de cadmio son *Burkholderia* sp y *Enterobacter* sp.
- Los hongos formadores de micorrizas arbusculares (HFMA) son una alternativa que debe ser estudiada mas a fondo, pues a través de la revisión literaria se evidenció la diferencia en los resultados de las investigaciones, lo que se atribuye a la interacción entre el genotipo del hongo así como el genotipo de la planta, en especial el genotipo del patrón de la planta de cacao.

RECOMENDACIONES

Es fundamental continuar con la investigación acerca de la biorremediación del cadmio en cultivos de cacao, a través, del uso de microorganismos vivos, con el fin de que la comunidad campesina, asistentes técnicos y profesionales de la cacaocultura, se provean de métodos y nuevas técnicas o tecnologías que puedan usar dentro de sus cultivos con el fin de mitigar la bioacumulación de cadmio en el suelo, la planta y la semilla de cacao.

Se recomienda por el momento, el uso consciente de prácticas preventivas ante la contaminación de cadmio, reduciendo el uso de fertilizantes fosfatados, promoviendo el uso y conservación de microorganismos eficientes en el suelo. No obstante, en el caso en que se confirme un alto contenido de Cd en almendras o productos del cacao proveniente del lugar, se pueden aplicar temporalmente técnicas convencionales como el uso de cal o biocarbón, nitrato de hierro, silicio y zinc, sin olvidar el compromiso para la conservación del medio ambiente.

REFERENCIAS

- Abbas, S. Z., Rafatullah, M., Hossain, K., Ismail, N., Tajarudin, H. A., & Abdul Khalil, H. P. S. (2017). A review on mechanism and future perspectives of cadmium-resistant bacteria. *International Journal of Environmental Science and Technology* 2017 15:1, 15(1), 243–262. <https://doi.org/10.1007/S13762-017-1400-5>
- Agbeniyi, S. O., Ogunlade, M. O., & Oluyole, K. A. (2010). Fertilizer use and cocoa production in cross river state , nigeria. *Journal of Agricultural and Biological Science*, 5(3), 10–13. 5(3), 10–13.
- Aikpokpodion, P. E., Lajide, L., & Aiyesanmi, A. F. (2012). Metal fractionation in soils collected from selected cocoa plantations in ogun state, Nigeria. *World Applied Sciences Journal*, 20(5), 628–636. <https://doi.org/10.5829/idosi.wasj.2012.20.05.2769>
- Al Qabany, A., Soga, K., & Santamarina, C. (2012). Factors Affecting Efficiency of Microbially Induced Calcite Precipitation. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 138(8), 992–1001. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000666](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000666)
- Aryal, M. (2021). A comprehensive study on the bacterial biosorption of heavy metals: Materials, performances, mechanisms, and mathematical modellings. *Reviews in Chemical Engineering*, 37(6), 715–754. <https://doi.org/10.1515/REVCE-2019-0016/XML>
- Ayangbenro, A. S., & Babalola, O. O. (2017). A New Strategy for Heavy Metal Polluted Environments: A Review of Microbial Biosorbents. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(1). <https://doi.org/10.3390/IJERPH14010094>
- Barraza, F., Schreck, E., Lévêque, T., Uzu, G., López, F., Ruales, J., Prunier, J., Marquet, A., & Maurice, L. (2017). Cadmium bioaccumulation and gastric bioaccessibility in cacao: A field study in areas impacted by oil activities in Ecuador. *Environmental Pollution*, 229, 950–963. <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2017.07.080>
- Beltrán-Pineda, M. E., & Gómez-Rodríguez, A. M. (2016). Biorremediación de metales pesados cadmio (Cd), cromo (Cr) y mercurio (Hg), mecanismos bioquímicos e ingeniería genética: una revisión. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*, 12(2), 172–197. <https://doi.org/10.18359/rfcb.2027>
- Bertoldi, D., Barbero, A., Camin, F., Caligiani, A., & Larcher, R. (2016). Multielemental fingerprinting and geographic traceability of Theobroma cacao beans and cocoa products. *Food Control*, 65, 46–53. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2016.01.013>
- Beveridge, T. J. (1989). Role of cellular design in bacterial metal accumulation and mineralization. *Annual Review of Microbiology*, 43, 147–171. <https://doi.org/10.1146/ANNUREV.MI.43.100189.001051>
- Bhattacharya, A., Naik, S. N., & Khare, S. K. (2018). Harnessing the bio-mineralization ability of urease producing *Serratia marcescens* and *Enterobacter cloacae* EMB19 for remediation of heavy metal cadmium (II). *Journal of Environmental Management*, 215, 143–152. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2018.03.055>
- Bhayani, A., Mehta, K., Bhattacharya, S., Mishra, S., & Dineshkumar, R. (2020).

Facultad de Ciencias Agropecuarias

- Microbial-assisted heavy metal remediation: Bottlenecks and prospects. *Removal of Toxic Pollutants Through Microbiological and Tertiary Treatment*, 349–372.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821014-7.00014-9>
- Bravo, C. P. (2020). Metales pesados: Fuentes y su toxicidad sobre la salud humana. (2019)Revista de investigación de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann. <https://doi.org/10.33326/27066320.2018.1.842>
- Bravo, D., & Braissant, O. (2022). Cadmium-tolerant bacteria: current trends and applications in agriculture. *Letters in Applied Microbiology*, 74(3), 311–333.
<https://doi.org/10.1111/lam.13594>
- Bravo, D., Pardo-Díaz, S., Benavides-Erazo, J., Rengifo-Estrada, G., Braissant, O., & Leon-Moreno, C. (2018). Cadmium and cadmium-tolerant soil bacteria in cacao crops from northeastern Colombia. *Journal of Applied Microbiology*, 124(5), 1175–1194. <https://doi.org/10.1111/jam.13698>
- Bravo & Benavides, J. (2020). The Use of a Two-Dimensional Electrical Resistivity Tomography (2D-ERT) as a Technique for Cadmium Determination in Cacao Crop Soils. *Applied Sciences* 2020, Vol. 10, Page 4149, 10(12), 4149.
<https://doi.org/10.3390/APP10124149>
- Cadmio, este asesino silencioso, escondido en fertilizantes con fosfatos - Red de Desarrollo Sostenible de Colombia.* (n.d.). Retrieved September 12, 2022, from <https://www.rds.org.co/es/cadmio-este-asesino-silencioso-escondido-en-fertilizantes>
- Canchignia Martínez, F.; Auhing Arcos, J.; Cedeño Moreira, Á.; Carrillo, M.; Bravo, D. . (2021). Mitigación De Cadmio Por Microorganismos. In *Caja de herramientas para prevención y mitigación de la contaminación de cadmio en la cadena de cacao-Ecuador*. [https://balcon.mag.gob.ec/mag01/magapaldia/Caja de Herramientas_Cadmio_Cacao/Guia_12.pdf](https://balcon.mag.gob.ec/mag01/magapaldia/Caja%20de%20Herramientas_Cadmio_Cacao/Guia_12.pdf)
- Castillo, J., Pérez-López, R., Caraballo, M. A., Nieto, J. M., Martins, M., Costa, M. C., Olías, M., Cerón, J. C., & Tucoulou, R. (2012). Biologically-induced precipitation of sphalerite–wurtzite nanoparticles by sulfate-reducing bacteria: Implications for acid mine drainage treatment. *Science of The Total Environment*, 423, 176–184.
<https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2012.02.013>
- Castillo, J., Pérez-López, R., Sarmiento, A. M., & Nieto, J. M. (2012). Evaluation of organic substrates to enhance the sulfate-reducing activity in phosphogypsum. *The Science of the Total Environment*, 439, 106–113.
<https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2012.09.035>
- Castro, A. V, de Almeida, A.-A. F., Pirovani, C. P., Reis, G. S. M., Almeida, N. M., & Mangabeira, P. A. O. (2015). Morphological, biochemical, molecular and ultrastructural changes induced by Cd toxicity in seedlings of *Theobroma cacao* L. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 115, 174–186.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2015.02.003>
- Chancay Alcívar, L. F., Delgado Demera, M., & Salas Macías, C. A. (2022). Cadmio en el cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.) y sus efectos ambientales. *La Técnica: Revista de Las Agrociencias*. ISSN 2477-8982, 91.
https://doi.org/10.33936/la_tecnica.v0i0.4324
- Comisi, L. A., Alimentaria, C., Alimentaria, C., Alimentarios, A., Alimentarios, A.,

Facultad de Ciencias Agropecuarias

- Europea, A., & Alimentaria, S. (2011). Statement on tolerable weekly intake for cadmium. *EFSA Journal*, 9(2), 10–14. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2011.1975>
- Covelo, E. F., Vega, F. A., & Andrade, M. L. (2007). Heavy metal sorption and desorption capacity of soils containing endogenous contaminants. *Journal of Hazardous Materials*, 143(1–2), 419–430. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2006.09.047>
- Fernández, J., & Rodríguez, F. (2019). *Ciencia Unisalle De cacao , cadmio y micorrizas : un vínculo genético insospechado.*
- Doaré, F., Ribeyre, F., & Cilas, C. (2020). Genetic and environmental links between traits of cocoa beans and pods clarify the phenotyping processes to be implemented. *Scientific Reports*, 10(1), 1–6. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-66969-9>
- Elsas, J. D. van (Jan D. . (n.d.). *Modern soil microbiology*. Retrieved October 27, 2022, from <https://www.perlego.com/book/2193523/modern-soil-microbiology-third-edition-pdf>
- Felipe, J., & Pineda, S. (2019). *Efecto de las comunidades locales de hongos formadores de micorrizas arbusculares y patrones de injertación en la fisiología de plántulas de cacao sometidas a estrés por cadmio y zinc. Tesis de maestría. 148 p.*
- Grant, C. A., Clarke, J. M., Duguid, S., & Chaney, R. L. (2008). Selection and breeding of plant cultivars to minimize cadmium accumulation. *Science of The Total Environment*, 390(2–3), 301–310. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2007.10.038>
- Guerra, B. E., Muñoz Guerrero, J., Gutierrez, E., & Duarte, D. (2018, September 19). *Cacao: Cadmio y Biorremediación - Engormix.* <https://www.engormix.com/agricultura/articulos/cacao-cadmio-biorremediacion-t42789.htm>
- Harris-Valle, C., Esqueda, M., Valenzuela-Soto, E. M., & Castellanos, A. E. (2009). Tolerancia al estrés hídrico en la interacción planta-hongo micorrízico arbuscular: Metabolismo energético y fisiología. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 32(4), 265–271. <https://doi.org/10.35196/RFM.2009.4.265-271>
- Hou, D., O'Connor, D., Igalavithana, A. D., Alessi, D. S., Luo, J., Tsang, D. C. W., Sparks, D. L., Yamauchi, Y., Rinklebe, J., & Ok, Y. S. (2020). Metal contamination and bioremediation of agricultural soils for food safety and sustainability. *Nature Reviews Earth & Environment* 2020 1:7, 1(7), 366–381. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0061-y>
- Kang, C. H., Han, S. H., Shin, Y., Oh, S. J., & So, J. S. (2014). Bioremediation of Cd by microbially induced calcite precipitation. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 172(4), 1929–1937. <https://doi.org/10.1007/S12010-013-0626-Z>
- Kenney, J. P. L., & Fein, J. B. (2011). Importance of extracellular polysaccharides on proton and Cd binding to bacterial biomass: A comparative study. *Chemical Geology*, 286(3–4), 109–117. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMGEO.2011.04.011>
- Khadivinia, E., Sharafi, H., Hadi, F., Zahiri, H. S., Modiri, S., Tohidi, A., Mousavi, A., Salmanian, A. H., & Noghabi, K. A. (2014). Cadmium biosorption by a glyphosate-

Facultad de Ciencias Agropecuarias

- degrading bacterium, a novel biosorbent isolated from pesticide-contaminated agricultural soils. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 20(6), 4304–4310. <https://doi.org/10.1016/J.JIEC.2014.01.037>
- Krebs, W., Brombacher, C., Bosshard, P. P., Bachofen, R., & Brandl, H. (1997). Microbial recovery of metals from solids. *FEMS Microbiology Reviews*, 20(3–4), 605–617. <https://doi.org/10.1111/J.1574-6976.1997.TB00341.X>
- Long, J., Yu, M., Xu, H., Huang, S., Wang, Z., & Zhang, X. X. (2021). Characterization of cadmium biosorption by inactive biomass of two cadmium-tolerant endophytic bacteria *Microbacterium* sp. D2-2 and *Bacillus* sp. C9-3. *Ecotoxicology (London, England)*, 30(7), 1419–1428. <https://doi.org/10.1007/S10646-021-02363-Z>
- Maddela, N. R., Kakarla, D., García, L. C., Chakraborty, S., Venkateswarlu, K., & Megharaj, M. (2020). Cocoa-laden cadmium threatens human health and cacao economy: A critical view. *Science of the Total Environment*, 720, 137645. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137645>
- Marrero-Coto, J., Díaz-Valdivia, A., & Coto-Pérez, O. (2010). Mecanismos moleculares de resistencia a metales pesados en las bacterias y sus aplicaciones en la biorremediación. *Revista CENIC Ciencias Biológicas*, 41(1), 001–012. <https://revista.cnic.edu.cu/index.php/RevBiol/article/view/609>
- Mishra, G. K. (2017). Microbes in Heavy Metal Remediation: A Review on Current Trends and Patents. *Recent Patents on Biotechnology*, 11(3). <https://doi.org/10.2174/1872208311666170120121025>
- Nieves, Parra, Villanueva, & Henriquez. (2019). (PDF) *Nota técnica: biorremediación, enemigo del cadmio*. Revista Ingeniería UC. https://www.researchgate.net/publication/332856216_Tech_note_bioremediation_enemy_of_cadmium
- Oliveira, B. R. M., de Almeida, A. A. F., Santos, N. de A., & Pirovani, C. P. (2022). Tolerance strategies and factors that influence the cadmium uptake by cacao tree. *Scientia Horticulturae*, 293(September 2020), 110733. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110733>
- Pócsi, I. (2011). Toxic Metal/Metalloid Tolerance in Fungi—A Biotechnology-Oriented Approach. *Cellular Effects of Heavy Metals*, 31–58. https://doi.org/10.1007/978-94-007-0428-2_2
- Ramtahal, G., Chang-yen, I., Bekele, I., & Harrynanan, L. (2012). Investigation of the effects of mycorrhizal fungi on cadmium. *Proceedings of the Caribbean Food Crops Society*, 48(May), 147–152.
- Rivera Mendez, Y., Galindo Castañeda, T., Caicedo, A. F., Navia, E. A., & Romero, H. M. (2014). Boletín Técnico N° 35. Hongos Formadores de Micorrizas Arbusculares (HFMA) en Palma de Aceite. In *Boletín Técnico N° 35 CENIPALMA* (Issue 35).
- Sanchez, G. (2016). Ecotoxicología del cadmio: riesgo para la salud de la utilización de suelos ricos en cadmio. *Facultad De Farmacia Universidad Complutense Trabajo*, 5(6), 23. http://147.96.70.122/Web/TFG/TFG/Memoria/GARA_SANCHEZ_BARRON.pdf
- Scaccabarozzi, D., Castillo, L., Aromatisi, A., Milne, L., Castillo, A. B., & Muñoz-Rojas,

Facultad de Ciencias Agropecuarias

- M. (2020). Soil, site, and management factors affecting cadmium concentrations in cacao-growing soils. *Agronomy*, 10(6), 1–15. <https://doi.org/10.3390/agronomy10060806>
- Shukla, P. K., Misra, P., Maurice, N., & Ramteke, P. W. (2019). Heavy metal toxicity and possible functional aspects of microbial diversity in heavy metal-contaminated sites. *Microbial Genomics in Sustainable Agroecosystems: Volume 2*, 255–317. https://doi.org/10.1007/978-981-32-9860-6_15/TABLES/8
- Singh, S., Kumar, V., Datta, S., Dhanjal, D. S., Sharma, K., Samuel, J., & Singh, J. (2020). Current advancement and future prospect of biosorbents for bioremediation. *Science of The Total Environment*, 709, 135895. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2019.135895>
- Tabak, H. H., Lens, P., Van Hullebusch, E. D., & Dejonghe, W. (2005). Developments in Bioremediation of Soils and Sediments Polluted with Metals and Radionuclides – 1. Microbial Processes and Mechanisms Affecting Bioremediation of Metal Contamination and Influencing Metal Toxicity and Transport. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology 2005 4:3*, 4(3), 115–156. <https://doi.org/10.1007/S11157-005-2169-4>
- Varjani, S. J., Kumar, A., Gnansounou, A. E., & Gurunathan, B. (n.d.). *Bioremediation: Applications for Environmental Protection and Management Energy, Environment, and Sustainability*. Retrieved October 27, 2022, from <http://www.springer.com/series/15901>
- Wuellins, D., Caicedo, M., Vera, D., Sotomayor, I., Saini, E., & Chávez, E. F. (2019). *Cadena del valor del cacao*. https://www.fontagro.org/new/uploads/adjuntos/Informe_CACAO_linea_base.pdf
- Xiao, L., Yu, Z., Liu, H., Tan, T., Yao, J., Zhang, Y., & Wu, J. (2020). Effects of Cd and Pb on diversity of microbial community and enzyme activity in soil. *Ecotoxicology (London, England)*, 29(5), 551–558. <https://doi.org/10.1007/S10646-020-02205-4>
- Xu, S., Luo, X., Huang, Q., & Chen, W. (2021). Calcium-crosslinked alginate-encapsulated bacteria for remediating of cadmium-polluted water and production of CdS nanoparticles. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 105(5), 2171–2179. <https://doi.org/10.1007/S00253-021-11155-8/FIGURES/6>
- Yang, Z., Shi, W., Yang, W., Liang, L., Yao, W., Chai, L., Gao, S., & Liao, Q. (2018). Combination of bioleaching by gross bacterial biosurfactants and flocculation: A potential remediation for the heavy metal contaminated soils. *Chemosphere*, 206, 83–91. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2018.04.166>
- Yasmeen, T., Li, A., Iqbal, S., Arif, M. S., Riaz, M., Shahzad, S. M., & Ali, S. (2019). Biotechnological Tools in the Remediation of Cadmium Toxicity. *Cadmium Tolerance in Plants: Agronomic, Molecular, Signaling, and Omic Approaches*, 497–520. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815794-7.00018-7>
- Zug, K. L. M., Huamaní Yupanqui, H. A., Meyberg, F., Cierjacks, J. S., & Cierjacks, A. (2019). Cadmium Accumulation in Peruvian Cacao (*Theobroma cacao* L.) and Opportunities for Mitigation. *Water, Air, and Soil Pollution*, 230(3), 1–18. <https://doi.org/10.1007/S11270-019-4109-X/FIGURES/4>