



Plataforma Multiagencia de Cacao (ATN/RF-17235-RG)

Producto 3: Selección de clones de cacao por país para edición génica

Eduardo Chávez

2024



Plataforma Multiagencia
Cacao 2030-2050





Códigos JEL: Q16

FONTAGRO (Fondo Regional de Tecnología Agropecuaria) es un mecanismo único de cooperación técnica entre países de América Latina, el Caribe y España, que promueve la competitividad y la seguridad alimentaria. Las opiniones expresadas en esta publicación son de los autores y no necesariamente reflejan el punto de vista del Banco Interamericano de Desarrollo (BID), del Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), FONTAGRO, de sus Directorios Ejecutivos ni de los países que representan.

El presente documento ha sido preparado por Eduardo Chávez.

Copyright © 2024 Banco Interamericano de Desarrollo. Esta obra se encuentra sujeta a una licencia Creative Commons IGO 3.0 Reconocimiento-NoComercial-SinObrasDerivadas (CC-IGO 3.0 BY-NC-ND) (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/igo/legalcode>) y puede ser reproducida para cualquier uso no comercial otorgando el reconocimiento respectivo al BID. No se permiten obras derivadas. Cualquier disputa relacionada con el uso de las obras del BID que no pueda resolverse amistosamente se someterá a arbitraje de conformidad con las reglas de la CNUDMI (UNCITRAL). El uso del nombre del BID para cualquier fin distinto al reconocimiento respectivo y el uso del logotipo del BID no están autorizados por esta licencia CC-IGO y requieren de un acuerdo de licencia adicional. Note que el enlace URL incluye términos y condiciones adicionales de esta licencia.

Esta publicación puede solicitarse a:

FONTAGRO

Correo electrónico: fontagro@fontagro.org

www.fontagro.org



Tabla de Contenidos

Abstract	5
Resumen EJECUTIVO.....	6
1. Introducción.....	7
2. Información de Relevancia	9
3. Objetivo.....	11
4. Resultados y Discusión	11
5. Conclusiones y recomendaciones	15
Referencias Bibliográficas	16
Instituciones participantes.....	21



INDICE FIGURAS

Figura 1. Concentración de cadmio (Cd) en la parte aérea de las variedades de cacao utilizadas en un experimento hidropónico a una concentración estable de Cd = 0.05 mg L⁻¹	12
Figura 2. Factor de transferencia (TF) de Cd en hojas con relación a la concentración de Cd total en suelos en 38 variedades de cacao. El estudio se llevó a cabo en un jardín clonal en San Vicente de Chucurí en Colombia	13



ABSTRACT

Cadmium (Cd) is a trace element found in foodstuff and is known for its cumulative effect on the human body. In prolonged exposure, the accumulation of Cd can cause serious health problems for consumers, leading regulatory health agencies to establish maximum limits allowed in ready-for-sale products. In this context, the European Union set maximum limits for chocolate and its by-products ranging from 0.10 to 0.80 mg kg⁻¹. Several scientific publications report that cacao from Latin America and the Caribbean (LAC) has a higher concentration of Cd than that produced in Africa.

Since the publication of the regulation, scientific research to find alternatives to mitigate high levels of Cd in LAC cacao has increased exponentially. Among the most explored alternatives are agricultural mitigation measures through the use of soil amendments. However, these strategies are costly and may have ambiguous results as they depend on the quality of the amendment and the soil-amendment interaction. The use of cacao varieties with low Cd accumulation has been suggested by several authors. These studies have been conducted in Peru, Trinidad and Tobago, Colombia, and Honduras. Researchers report a difference between high and low Cd varieties of 4:1 (on average), encouraging the search for materials with lower Cd absorption.

In a preliminary study, six varieties with potential for lower Cd absorption in the above-ground part were reported. This study was conducted under two conditions: hydroponics with a targeted Cd concentration (in Ecuador and Costa Rica) and in an open-field clonal garden (in Colombia) with natural soil Cd variation. In both studies, it was determined that the varietal difference in Cd absorption was 3:1 in hydroponics and > 8:1 in the field. This demonstrates that cacao varieties differ in Cd uptake and accumulation. Based on this information, it is proposed that the varieties: EET558, EET400, PMCT58, FSV1, FSV2, and FLE3, are part of a genetic and/or mass propagation program for future Cd testing on pilot farms. In these trials, factors such as pest and disease resistance, organoleptic characteristics, yield and adaptation to climate change should be evaluated in addition to Cd concentration in cocoa beans. These tests should be conducted in contrasting soil and climatic conditions at known hotspots.

It is necessary to search for additional funding to continue the genetics research developed by the project. This may be the only viable alternative for areas with naturally high concentrations of Cd specially in regions where other mitigation strategies, such as soil amendments, may not be feasible.

Keywords: Genetic engineering, asexual propagation, clones, varieties, transfer factor.



RESUMEN EJECUTIVO

Cadmio (Cd) es un elemento traza presente en alimentos y es conocido por su efecto acumulativo en el cuerpo humano. De existir una exposición prolongada, la acumulación de Cd puede causar graves problemas a la salud de los consumidores, por lo que agencias de regulación sanitaria y de salud pública establecen límites máximos permitidos en alimentos. En este contexto, la Unión Europea estableció límites máximos para chocolate y sub-productos de entre 0.10 y 0.80 mg kg⁻¹. En varias publicaciones científicas se reporta que el cacao de América Latina y el Caribe (ALC) posee una mayor concentración de Cd que el producido en África.

A partir de la publicación de la regulación, la investigación científica para encontrar alternativas de mitigación de los altos niveles de Cd en el cacao de ALC se incrementó exponencialmente. Dentro de las alternativas más exploradas se encuentran las medidas de mitigación agrícolas mediante el uso de enmiendas. Sin embargo, estas estrategias son de alto costo y pueden tener resultados ambiguos ya que dependerán de la calidad de las enmiendas y la relación con el suelo. El uso de variedades de cacao con baja acumulación de Cd ha sido sugerido por varios autores. Estos estudios han sido conducidos en Perú, Trinidad y Tobago, Colombia y Honduras. Los investigadores reportan una diferencia entre variedades de alto y bajo Cd de 4:1 (promedio) lo que alienta a la búsqueda de materiales con menor absorción Cd.

En un primer producto, se reportaron seis variedades con potencial de menor absorción de Cd en la parte aérea. Este estudio se realizó en dos condiciones: hidroponía con una concentración de Cd conocida (en Ecuador y Costa Rica) y en un jardín clonal a campo abierto (en Colombia) con una variación de Cd en suelo natural. En ambos estudios, se determinó que la diferencia varietal en la absorción de Cd fue de 3:1 en hidroponía y > 8:1 en campo. Esto demuestra que las variedades de cacao tienen una diferencia en la toma y acumulación de Cd. Con esta información, se propone que las variedades: EET558, EET400, PMCT58, FSV1, FSV2, y, FLE3, sean parte de un programa de mejoramiento genético y/o propagación masiva para futuras pruebas de Cd en fincas demostrativas. En estas pruebas, factores como resistencia a plagas y enfermedades, características organolépticas, rendimiento y adaptación al cambio climático deben de ser evaluadas adicional a la concentración de Cd en almendras de cacao. Estas pruebas deben de hacerse en condiciones edafoclimáticas contrastantes en sitios identificados como puntos calientes.

Es necesario poder apalancar fondos adicionales que permitan continuar con el trabajo de genética desarrollado por el proyecto. Esta quizá sea la única alternativa viable para zonas de altas concentraciones de Cd natural y que no sea posible implementar otras estrategias de mitigación, por ejemplo, aplicación de enmiendas al suelo.

Palabras Claves: Ingeniería genética, propagación asexual, clones, variedades, factor de transferencia



1. INTRODUCCIÓN

La producción de cacao en la región de Latinoamérica y el Caribe (LAC) registra un crecimiento sostenido en los últimos 10 años. Este patrón ha sido, impulsado por el desarrollo de una oferta por calidad que posiciona a LAC como productora del 80% del cacao fino y de aroma del mundo. Esta diferenciación promueve la exportación de almendras de cacao y productos semielaborados como materia prima para la industria de chocolates en la Unión Europea (UE) (Quintero & Díaz Morales, 2004; Cruz & Cañas, 2018).

A nivel regional, Ecuador se consolida como el tercer exportador mundial de cacao en almendra producto del fomento del cultivo de la variedad Nacional (CN) y del CCN-51 (León et al., 2016). En el caso de Colombia, su estrategia de producción se basa en el uso de clones o variedades genéticas regionales y universales bajo la distinción, otorgada por la ICCO en 2021, de cacao fino y de aroma (FEDECACAO, 2021). De otra parte, y de manera particular con respecto a los otros países, la producción en Colombia, en más del 50%, es consumida localmente, y el excedente es exportado como materia prima o productos elaborados a mercados, particularmente USA y UE (Forero & Reyes, 2022; Gil et al., 2023; Ramírez et al., 2023). En Centroamérica, particularmente Costa Rica, ha logrado posicionarse como productor al 100% cacao de calidad, con oportunidades comerciales con gran potencial para la exportación a la UE (Ministerio de Agricultura y Ganadería, 2018).

Pese a estos progresos en la producción de cacao en LAC, en la última década, ha surgido una creciente preocupación sobre la presencia de contaminantes, especialmente, por la presencia de cadmio (en adelante se denominará por su símbolo químico: Cd). Esta preocupación se incrementó a partir de que la Unión Europea estableció límites máximos permisibles para este contaminante en chocolate y productos derivados (European Food Safety Authority, 2012; Abt & Robin, 2020). Esta regulación se origina principalmente por sus implicaciones en salud humana. Cadmio es un metal pesado altamente tóxico que se encuentra de forma natural en el medio ambiente (Bernard, 2008; Godt et al., 2006). El consumo de alimentos que contienen este metal conlleva a efectos adversos en la salud humana, como daño renal, enfermedades cardiovasculares, fragilidad ósea, cáncer de páncreas y repercusiones negativas en la reproducción humana (Bhattacharyya, 2009; Fatima et al., 2019; Kumar & Sharma, 2019; Satarug 2019; Suhani et al., 2021).

Esta regulación, que se implementó a partir del 1^{ero} de enero del 2019, ha tenido implicaciones socioeconómicas para los países productores y ha generado el interés científico con el objetivo de comprender los mecanismos de absorción del metal por parte del cultivo de cacao; así como la búsqueda de medidas o estrategias para mitigar agrónomicamente el problema (Maddela et al., 2020; Florida Rofner, 2021).



Una de estas estrategias exploradas por el proyecto es la identificación de variedades con menor absorción de Cd. El proyecto realizó estudios en condiciones controladas y campo para determinar el potencial de las variedades para acumular o no el contaminante. El objetivo de esta actividad fue identificar variedades que puedan ser utilizadas en programas de mejoramiento genético para tener variedades con baja absorción de Cd y alta productividad.



2. INFORMACIÓN DE RELEVANCIA

Se ha documentado que la presencia de Cd en los productos con chocolate proviene de la almendra de cacao (Vanderschueren et al., 2021). Este cultivo es especialmente susceptible a la acumulación de Cd en sus tejidos debido a su alta capacidad para absorberlo del suelo (Suhani et al., 2021; Galvis et al., 2023a). La transferencia del Cd desde el suelo, hasta las raíces y luego hasta las hojas (denominado también factor de translocación o TF, por sus siglas en inglés), parece ser un mecanismo que está influenciado por una amplia gama de factores edafoclimáticos y genéticos, entre los que se destacan los físico-químicos de suelo, agronómicos y varietales (Moore et al., 2020; Scaccabarozzi et al., 2020).

Dentro de los factores edáficos, las concentraciones de Cd en las almendras aumentan a medida que se incrementa la disponibilidad del elemento en suelo. Esta disponibilidad es afectada principalmente por el pH, el contenido en suelo de Zn, Mn, Fe, Ca y carbono orgánico (Chavez et al., 2015; Barraza et al., 2017; Argüello et al., 2019; Bravo et al., 2021). Entre los aspectos agronómicos, la edad de plantación influye en la acumulación de Cd, a mayor edad de plantación la concentración en las almendras se incrementa. Este fenómeno puede explicarse por el tiempo de acumulación de Cd en la biomasa aérea de las plantas, sobre todo de troncos y ramas (Blommaert et al., 2022). Otros factores como el uso de prácticas de poda y el manejo de la fertilización potencialmente, afectarán la acumulación de este metal, aunque su efecto no se reporta con frecuencia (Argüello et al., 2019; Zug et al., 2019). De otra parte, también se ha reportado que la topografía de la zona del cultivo puede influir en las variaciones intra-específicas del contenido de Cd tanto en suelos como en la plantación dentro de una misma finca (Bravo et al., 2020; Gil et al., 2021).

En cuanto a los factores genéticos, de forma preliminar se ha reportado que diferentes variedades muestran niveles variables de absorción de Cd (Arévalo-Gardini et al., 2017). Esto ha propiciado la identificación de variedades potenciales con baja absorción de Cd a través de experimentos en invernadero y jardines clonales (Lewis et al., 2018; Arévalo-Hernández et al., 2021). La absorción de Cd ocurre a nivel de raíces. Luego, el elemento pasa a través del xilema por el tallo, hacia tejidos aéreos y se acumula en las almendras de cacao como un mecanismo de desintoxicación (Vanderschueren et al., 2023). Otros investigadores han encontrado diferencias en absorción y partición de Cd en las plantas (Galvis et al., 2023a). Esto resalta el potencial de utilizar estrategias genéticas para reducir el contenido de Cd en las almendras de cacao, a través de mejoramiento genético y mediante el uso de patrones y/o copas con baja absorción (Ullah et al., 2018; Lewis et al., 2018; Maddela et al., 2020; Galvis et al., 2023b).

El estudio de las variedades y su diferencia en absorción de Cd permitió identificar cultivares de cacao con capacidad de excluir Cd en solución y suelo (Solano et al., 2023). En este proyecto se identificaron variedades de baja acumulación como el PMCT58 y EET558, y de bioestabilización en raíces como el CATIER4 y el EET400. Otros autores han explorado el uso de variedades de baja



acumulación de Cd, pero se ha centrado principalmente en materiales ampliamente utilizados como el CCN51, Nacional, Pound12 y EET400 (Arévalo-Hernández et al., 2021; Oliva et al., 2020; de Almeida et al., 2022). Sin embargo, no existía información sobre las nuevas variedades regionales desarrollados en Ecuador, Colombia o Costa Rica y que han sido distribuidos en los diferentes países por sus cualidades de productividad y calidad industrial.

Las variedades de baja acumulación de Cd identificadas en nuestro estudio deberían ser estudiadas a nivel genético para entender los mecanismos moleculares de exclusión de Cd. Esto daría luces a los fitomejoradores acerca de los genes de exclusión que deben de ser transferidos en las nuevas variedades, para que incluyan, además de características productivas, una baja acumulación de Cd. Desafortunadamente, en la actualidad, las variedades más productivas de cacao tienen una mayor absorción y acumulación de Cd en las almendras (Solano et al., 2023). El objetivo de este producto es proveer de información inicial para orientar futuros trabajos de mejoramiento genético. Adicionalmente, la información de este producto, y en lo reportado por Solano et al., (2023) puede servir para utilizar a estas variedades de baja absorción como patrones y variedades de alta productividad como esquejes. Una restricción para esta alternativa es el conocimiento limitado sobre la reproducción asexual y masiva de las variedades EET558 y PMCT58. Para nuestra investigación, utilizamos la técnica de enraizamiento por esquejes, pero esta técnica no es recomendable para zonas de alta pendiente (como en muchas fincas de la región) debido a que el sistema radicular de este tipo de propagación es muy superficial.

Los programas de fitomejoramiento en especies perenes como cacao son de largo plazo. Por lo tanto, el mejoramiento genético, utilizando ingeniería genética para reducir la concentración de Cd en almendras tomará al menos 10 años, de acuerdo con expertos. Este tiempo es necesario para poder determinar la capacidad de absorción de Cd en condiciones de campo. En esta línea, un proyecto de esta magnitud debería de incluir esfuerzos públicos-privados para asegurar disponibilidad de presupuesto por al menos 12 años y así poder dilucidar el efecto en campo de variedades de cacao mejoradas para una menor absorción de Cd.



3. OBJETIVO

El objetivo de este trabajo es enlistar las variedades identificadas como de baja acumulación de Cd y que puedan ser incluidas en un programa de mejoramiento genético de cacao. Estas variedades están disponibles en bancos de germoplasma de los centros de investigación o asociaciones de productores de Ecuador, Colombia y Costa Rica para su uso.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este producto se utilizarán los resultados reportados por Solano et al., (2023) donde cuantificaron las diferencias de absorción entre variedades de cacao en Ecuador, Colombia y Costa Rica.

Lo primero que se utilizó para determinar las variedades con baja acumulación es la diferencia en la concentración de Cd en la parte aérea. Las plantas fueron expuestas a una solución nutritiva con una concentración constante ($Cd = 0,04 \text{ mg L}^{-1}$) en condiciones de hidroponía. Los estudios de hidroponía ayudan a entender el efecto varietal de forma precisa ya que se aísla el efecto de la heterogeneidad natural de los suelos. La figura 1, muestra las diferencias en la concentración de Cd acumulada en la parte aérea de las variedades utilizadas para este estudio.

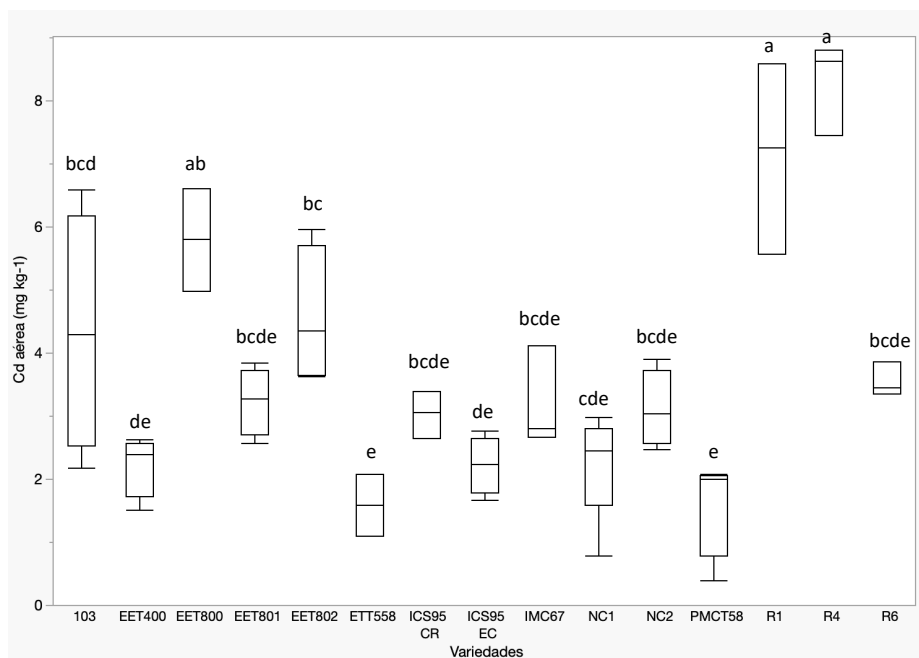


Figura 1. Concentración de cadmio (Cd) en la parte aérea de las variedades de cacao utilizadas en un experimento hidropónico a una concentración estable de Cd = 0.05 mg L⁻¹

De este estudio en condiciones controladas, se identifican variedades de baja absorción y sobre todo acumulación en la parte aérea. Las variedades EET558 y PMCT58 como las de menor acumulación y estadísticamente identificadas con el grupo “E”. Luego continúan las variedades ICS95 y EET 400, agrupadas estadísticamente con la letra “DE”. Finalmente, está la variedad no comercial 1 (NC1) que fue obtenida de un banco de germoplasma comercial en Ecuador que también tiene característica de baja acumulación. Las variedades EET pertenecen a materiales liberados por INIAP en Ecuador en los últimos años. La EET558 es una variedad recomendada para zonas secas dada su adaptación a estas condiciones. Sin embargo, su capacidad productiva no es muy alta, comparada con otras variedades liberadas recientemente (Amores et al., 2009). La variedad EET400 es utilizada normalmente como patrón por sus raíces profundas y es propagado por semilla. La PMCT58 es una variedad obtenida por el CATIE en Costa Rica, es conocida por su resistencia a enfermedades y alto nivel productivo (Phillips-Mora et al., 2012).

En un estudio adicional llevado a cabo en Colombia, se colectaron muestras de un jardín clonal donde se preservan 38 variedades de cacao, algunas comerciales y otras en evaluación de aspectos productivos y organolépticos. Este jardín se encuentra en una zona catalogada como alta en Cd (*hotspot*) reportado por Bravo et al., (2018). La figura 2 muestra las concentraciones de Cd en la parte aérea ajustadas a las concentraciones de Cd en suelos (factor de transferencia).

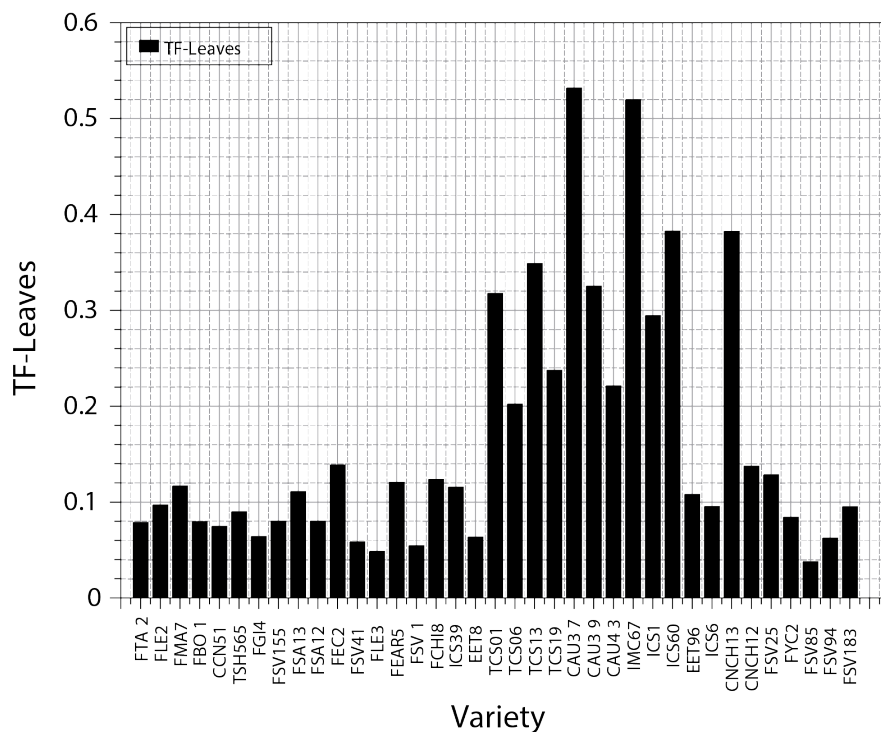


Figura 2. Factor de transferencia (TF) de Cd en hojas con relación a la concentración de Cd total en suelos en 38 variedades de cacao. El estudio se llevó a cabo en un jardín clonal en San Vicente de Chucurí en Colombia

De los datos analizados en el estudio de Colombia podemos identificar algunas variedades con baja acumulación de Cd, expresadas como la tasa de transferencia desde el suelo a las hojas (TF). Entre las más sobresalientes están la FSV1, FSV85 y FLE3. Todas estas variedades son comerciales y pertenecen a la Federación de Cacaoteros de Colombia – FEDECACAO. Estas tres variedades fueron colectadas por FEDECACAO en el departamento de Santander, las dos primeras en San Vicente de Chucurí y la última en Lebrija (FEDECACAO, 2021). Cabe mencionar que el departamento de Santander provee el 48% de cacao de Colombia y tiene zonas identificadas de alto Cd. El FSV1 es un cultivar de alta calidad organoléptica incluso ganador de premios en el salón del chocolate en París (FEDECACAO, 2019). Tiene además un potencial productivo superior a las 1.5 toneladas (Ton) ha⁻¹ y es altamente sembrado en la zona. El FSV2 es un material no comercial que está en fase de evaluación que posee buenas calidades productivas gracias a resistencia a enfermedades. El FLE3 es material ya comercial con alta calidad organoléptica y con un rendimiento potencial de 1.8 Ton ha⁻¹.



Tabla 1. Materiales de cacao por países con baja absorción de cadmio (Cd) y potencial para programas de mejoramiento o propagación masiva

Variedad	País	Estudio	Característica
EET58	Ecuador	Hidroponía con concentración de Cd constante (Cd = 0.05mg L ⁻¹)	Comercial, recomendado para zonas secas
EET400	Ecuador	Hidroponía con concentración de Cd constante (Cd = 0.05 mg L ⁻¹)	Comercial, recomendado como patrón y propagado por semilla
PMCT58	Costa Rica	Hidroponía con concentración de Cd constante (Cd = 0.05 mg L ⁻¹)	Comercial, resistencia a enfermedades
FSV1	Colombia	Jardín clonal – nivel de Cd en suelo variable	Comercial, alta calidad organoléptica
FSV2	Colombia	Jardín clonal – nivel de Cd en suelo variable	No comercial
FLE3	Colombia	Jardín clonal – nivel de Cd en suelo variable	Comercial, resistencia a enfermedades y alta producción



5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La identificación de variedades con baja capacidad de absorción de Cd es una alternativa viable para la mitigación del contaminante. El proyecto permitió identificar variedades de baja absorción tanto en condiciones controladas (invernadero) como en campo. La diferencia entre las variedades de alta y baja absorción es de 3:1 (aproximadamente) por lo que es necesario estudiar estas variedades en condiciones de campo a largo plazo.

El presente producto busca proveer de un insumo útil para los fitomejoradores de cacao que incluya la capacidad de baja absorción/acumulación de Cd en las almendras. El fitomejoramiento clásico puede tomar muchos años hasta poder lograr las características deseadas en las progenies. Una alternativa para acortar el tiempo de obtención es el uso de ingeniería genética. Esta técnica ha sido muy utilizada para acelerar los procesos de mejoramiento genético en especies como arroz, caña de azúcar, entre otros. Una de las alternativas de ingeniería genética es el uso de CRISPR/Cas9 para modificar genéticamente algunas características fenotípicas de las plantas. El uso de esta tecnología está muy restringido en Europa y las variedades de cacao que provengan de esta tecnología pueden enfrentar barreras para la entrada a este mercado. Cabe mencionar que la Unión Europea fue la que inició con la regulación de Cd en chocolate.

Una alternativa al mejoramiento genético (tradicional o por ingeniería) es el uso de variedades ya comercializadas que son productos de programas de hibridación (natural o supervisados) y que pueden ser utilizadas inmediatamente para pruebas de campo. Estas variedades enlistadas en la tabla 1 deben ser estudiadas a profundidad para (i) conocer los mecanismos genéticos por los cuales tienen baja capacidad de absorber/acumular Cd. Una vez entendido el mecanismo se pueden realizar pruebas en jardines clonales en varios países para conocer las variedades que posean estos genes relacionados a la baja absorción de Cd. (ii) Estudiar métodos de propagación asexual masiva para estas variedades. En el experimento realizado en hidroponía la propagación se realizó mediante enraizamiento de estacas, muy utilizado para propagar variedades del grupo trinitario (CCN 51 por ejemplo). Sin embargo, en el ensayo de variedades algunas plantas propagadas por este mecanismo no pudieron crecer de forma normal teniendo problemas principalmente para emitir raíces. El uso de embriogénesis somática, que ya ha sido empleada en cacao es una alternativa que se puede explorar, una limitante es que esta forma de propagación asexual no ha sido perfeccionada para todas las variedades y necesita ser ajustada para que sea técnica y económicamente viable.

Es necesario continuar con el trabajo proyectado por el componente de genética y explorar mecanismos de financiamiento para diseñar un programa de investigación a largo plazo que permita recomendar variedades (mejoradas o no) de baja acumulación para los puntos calientes. Esta alternativa, sumada a las reportadas en los productos 6 y 5 de la plataforma de cacao (Chavez & Moyano, 2024; Carillo et al., 2023), ayudarán a reducir la concentración de Cd en el producto final de exportación, sea este, almendras de cacao secas y fermentadas o chocolate.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abt, E., & Robin, L. P. (2020). Perspective on Cadmium and Lead in Cocoa and Chocolate. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 68(46), 13008-13015. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.9b08295>
- Amores, F., Agama, J., Mite., Jimenez, J., Loor., Quiroz, J. (2009). EET 544 y EEt 558 Nuevos clones de cacao nacional para la producción bajo riego en la península de Santa Elena. INIAP. Estación experimental tropical Pichilingue. Boletín técnico #134. <https://repositorio.iniap.gob.ec/bitstream/41000/1583/1/Bolet%c3%adn%20t%c3%a9cnico%20N%c2%ba%20134.PDF>
- Arévalo-Gardini, E., Arévalo-Hernández, C. O., Baligar, V. C., & He, Z. L. (2017). Heavy metal accumulation in leaves and beans of cacao (*Theobroma cacao* L.) in major cacao growing regions in Peru. *Science of The Total Environment*, 605-606, 792-800. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.06.122>
- Arévalo-Hernández, C. O., Arévalo-Gardini, E., Barraza, F., Farfán, A., He, Z., & Baligar, V. C. (2021). Growth and nutritional responses of wild and domesticated cacao genotypes to soil Cd stress. *Science of The Total Environment*, 763, 144021. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144021>
- Argüello, D., Chavez, E., Laurysen, F., Vanderschueren, R., Smolders, E., & Montalvo, D. (2019). Soil properties and agronomic factors affecting cadmium concentrations in cacao beans: A nationwide survey in Ecuador. *Science of The Total Environment*, 649, 120-127. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.292>
- 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>
- Bhattacharyya, M. H. (2009). Cadmium osteotoxicity in experimental animals: Mechanisms and relationship to human exposures. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 238(3), 258-265. <https://doi.org/10.1016/j.taap.2009.05.015>
- Bernard, A. (2008). Cadmium & its adverse effects on human health. *INDIAN J MED RES.*
- Blommaert, H., Aucour, A. M., Wiggerhauser, M., Moens, C., Telouk, P., Campillo, S., Beauchêne, J., Landrot, G., Testemale, D., Pin, S., Lewis, C., Umaharan, P., Smolders, E., & Sarret, G. (2022). From soil to cacao bean: Unravelling the pathways of cadmium translocation in a high Cd accumulating cultivar of *Theobroma cacao* L. *Frontiers in Plant Science*, 1–19. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1055912>



- Bravo, D., Pardo-Díaz, S., Benavides-Erazo, J., Rengifo-Estrada, G., Braissant, O., and LeonMoreno, C. (2018). Cadmium and cadmium-tolerant soil bacteria in cacao crops from northeastern Colombia. *J Appl Microbiol* 124, 1175-1194.
- Bravo, D., and Benavides-Erazo, J. (2020). The use of a two-dimensional electrical resistivity tomography (2D-ERT) as a technique for cadmium determination in cacao crop soils. *Appl Scie* 10, 1-17.
- Bravo, D., Leon-Moreno, C., Martínez, C. A., Varón-Ramírez, V. M., Araujo-Carrillo, G. A., Vargas, R., Quiroga-Mateus, R., Zamora, A., & Rodríguez, E. A. G. (2021). The First National Survey of Cadmium in Cacao Farm Soil in Colombia. *Agronomy*, 11(4), 761. <https://doi.org/10.3390/agronomy11040761>
- Carrillo, K., Arguedas, F., Quiroga-Mateus, R., Lopez, S., Bravo, D., Moyano, B., Chavez, E. (2023). Mapas y estrategias de mitigación de cadmio en plantaciones comerciales y sistemas agroforestales de cacao. [https://www.fontagro.org/new/uploads/productos/17235 - Producto 5.pdf](https://www.fontagro.org/new/uploads/productos/17235_Producto_5.pdf)
- Chavez, E., He, Z. L., Stoffella, P. J., Mylavarapu, R. S., Li, Y. C., Moyano, B., & Baligar, V. C. (2015). Concentration of cadmium in cacao beans and its relationship with soil cadmium in southern Ecuador. *Science of The Total Environment*, 533, 205-214. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.06.106>
- Chavez, E., Moyano, B., (2024). Estudio de métodos y tiempos de secado y fermentación del cacao sobre el contenido de cadmio. <https://www.fontagro.org/new/proyectos/plataforma-cacao-2030>
- Cruz, R. A., & Cañas, P. C. (2018). La importancia de la exportación del cacao en Colombia y los países en América Latina. *Revista Investigación & Gestión*, 1(1), Article 1. <https://doi.org/10.22463/26651408.1514>
- de Almeida, N. M., de Almeida, A.-A. F., Santos, N. de A., do Nascimento, J. L., de Carvalho Neto, C. H., Pirovani, C. P., Ahnert, D., & Baligar, V. C. (2022). Scion-rootstock interaction and tolerance to cadmium toxicity in juvenile *Theobroma cacao* plants. *Scientia Horticulturae*, 300, 111086. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111086>
- European Food Safety Authority. (2012). Cadmium dietary exposure in the European population. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2012.2551>
- Fatima, G., Raza, A. M., Hadi, N., Nigam, N., & Mahdi, A. A. (2019). Cadmium in Human Diseases: It's More than Just a Mere Metal. *Indian Journal of Clinical Biochemistry*, 34(4), 371-378. <https://doi.org/10.1007/s12291-019-00839-8>
- FEDECACAO (2019). Cacao colombiano, nuevamente entre los mejores del mundo en París. Sociedad de agricultores de Colombia. Nota prensa disponible en: <https://sac.org.co/cacao-colombiano-nuevamente-entre-los-mejores-del-mundo-en->



[paris/](#)

- FEDECACAO (2021). Guía técnica del cultivo de cacao en Colombia. file:///C:/Users/USUARIO/Downloads/GUIA%20TECNICA%20CULTIVO%20DE%20CACAO%20EN%20COLOMBIA_2021.pdf
- Florida Rofner, N. (2021). Revisión sobre límites máximos de cadmio en cacao (*Theobroma cacao* L.). *La Granja*, 34(2), 117-130. <https://doi.org/10.17163/lgr.n34.2021.08>
- Forero, N., & Reyes, L. (2022). Caracterización de Estrategias de Marketing Internacional para el cultivo de Cacao (*Theobroma cacao* L.) en Colombia. Tesis. <https://repositorio.ucundinamarca.edu.co/bitstream/handle/20.500.12558/4556/Forero%20%20Martínez%20Nasly%20Yuliza%20%20Reyes%20Niño%20Lida%20Natalia.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Galvis, Donald A., Yeirme Y. Jaimes-Suárez, Jairo Rojas Molina, Rosalba Ruiz, and Fabricio Eulalio Leite Carvalho. (2023a) Cadmium up taking and allocation in wood species associated to cacao agroforestry systems and its potential role for phytoextraction Plants. 12 (16): 2930. <https://doi.org/10.3390/plants12162930>
- Galvis, D. A., Jaimes-Suárez, Y. Y., Rojas Molina, J., Ruiz, R., León-Moreno, C. E., & Carvalho, F. E. L. (2023b). Unveiling Cacao Rootstock-Genotypes with Potential Use in the Mitigation of Cadmium Bioaccumulation. <https://doi.org/10.3390/plants12162941>
- Gil, A., Brennan, M., Chaudhary, A. K., & Maximova, S. N. (2023). Evaluation of cacao projects in Colombia: The case of the rural Productive Partnerships Project (PAAP). *Evaluation and Program Planning*, 97, 102230. <https://doi.org/10.1016/j.evalprogplan.2023.102230>
- Gil, J.P.; López-Zuleta, S.; Quiroga-Mateus, R.Y.; Benavides-Erazo, J.; Chaali, N.; Bravo, D. (2021). Cadmium distribution in soils, soil litter and cacao beans: A case study from Colombia. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 19, 2455–2476.
- Godt, J., Scheidig, F., Grosse-Siestrup, C., Esche, V., Brandenburg, P., Reich, A., & Groneberg, D. A. (2006). The toxicity of cadmium and resulting hazards for human health. *Journal of Occupational Medicine and Toxicology*, 1(1), 22. <https://doi.org/10.1186/1745-6673-1-22>
- Kumar, S., & Sharma, A. (2019). Cadmium toxicity: Effects on human reproduction and fertility. *Reviews on Environmental Health*, 34(4), 327-338. <https://doi.org/10.1515/reveh-20190016>
- León, F., Calderón, J., & Quintero., E. (2016). Estrategias para el cultivo, comercialización y Exportación del cacao fino de aroma en Ecuador. *Revista Ciencia UNEMI*. Recuperado 2 de octubre de 2023, de <https://www.redalyc.org/pdf/5826/582663825007.pdf>
- Lewis, C., Lennon, A. M., Eudoxie, G., & Umaharan, P. (2018). Genetic variation in bioaccumulation and partitioning of cadmium in *Theobroma cacao* L. *Science of The Total Environment*, 640-641, 696-703. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.365>



- 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>
- Ministerio de Agricultura y Ganadería. (2018). Plan Nacional de cacao. Recuperado 2 de octubre de 2023, de <https://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/E14-11072.pdf>
- Moore, R. E. T., Ullah, I., de Oliveira, V. H., Hammond, S. J., Strekopytov, S., Tibbett, M., Dunwell, J. M., & Rehkämper, M. (2020). Cadmium isotope fractionation reveals genetic variation in Cd uptake and translocation by *Theobroma cacao* and role of natural resistance-associated macrophage protein 5 and heavy metal ATPase-family transporters. *Horticulture Research*, 7(1), 71. <https://doi.org/10.1038/s41438-020-0292-6>
- Oliva, M., Rubio, K., Epquin, M., Marlo, G., & Leiva, S. (2020). Cadmium Uptake in Native Cacao Trees in Agricultural Lands of Bagua, Peru. *Agronomy*, 10(10), 1551. <https://doi.org/10.3390/agronomy10101551>
- Phillips-Mora, W., Arciniegas-Leal, A., Mata-Quirós, A., Motamayor-Arias, J. (2012). Catálogos de clones de cacao seleccionados por el CATIE para siembras comerciales. Edición 1, 68p. Manual técnico/CATIE No. 105. [https://cadenacacaoca.info/CDOC-Deployment/documentos/Catalogo de clones de cacao seleccionados por el CATIE para siembras comerciales.pdf](https://cadenacacaoca.info/CDOC-Deployment/documentos/Catalogo%20de%20clones%20de%20cacao%20seleccionados%20por%20el%20CATIE%20para%20siembras%20comerciales.pdf)
- Quintero R, M. L., & Díaz Morales, K. M. (2004). El mercado mundial del cacao. *Agroalimentaria*, 9(18), 47-59.
- Ramírez, K., Zambrano, G., Santos, A., Vázquez, Chávez, E., Moyano, B., Montealegre, F., Bravo, D., Sánchez, L., Ramírez, L. (2023). Análisis socioeconómico y de la incidencia de la nueva regulación sobre cadmio en las cadenas de valor de cacao en Ecuador, Colombia y Costa Rica. [https://www.fontagro.org/new/uploads/productos/17235 - Producto 8.pdf](https://www.fontagro.org/new/uploads/productos/17235_-_Producto_8.pdf)
- Satarug, S. (2019). Cadmium Sources and Toxicity. *Toxics* 7, 25.
- Scaccabarozzi, D., Castillo, L., Aromatisi, A., Milne, L., Búllon Castillo, A., & Muñoz-Rojas, M. (2020). Soil, Site, and Management Factors Affecting Cadmium Concentrations in Cacao Growing Soils. *Agronomy*, 10(6), 806. <https://doi.org/10.3390/agronomy10060806>
- Solano, L., Bravo, D., Ramirez, L., Moyano, B., Chavez, E. (2023). Variedades de cacao con características de menor acumulación de cadmio y mayor producción. [https://www.fontagro.org/new/uploads/productos/17235 - Producto 1.pdf](https://www.fontagro.org/new/uploads/productos/17235_-_Producto_1.pdf)
- Suhani, I., Sahab, S., Srivastava, V., & Singh, R. P. (2021). Impact of cadmium pollution on food safety and human health. *Current Opinion in Toxicology*, 27, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.cotox.2021.04.004>



- Ullah, I., Wang, Y., Eide, D. J., & Dunwell, J. M. (2018). Evolution, and functional analysis of Natural Resistance-Associated Macrophage Proteins (NRAMPs) from *Theobroma cacao* and their role in cadmium accumulation. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-32819-y>
- Vanderschueren, R., Argüello, D., Blommaert, H., Montalvo, D., Barraza, F., Maurice, L., Schreck, E., Schulin, R., Lewis, C., Vazquez, J. L., Umaharan, P., Chavez, E., Sarret, G., & Smolders, E. (2021). Mitigating the level of cadmium in cacao products: Reviewing the transfer of cadmium from soil to chocolate bar. *Science of The Total Environment*, 781, 146779. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146779>
- Vanderschueren, R., Helsen, F., Doevenspeck, J., & Delcour, J. A. (2023). Incubation tests mimicking fermentation reveal that phytate breakdown is key to lower the cadmium concentrations in cacao nibs. *Food Chemistry*, 398(August 2022), Article 133899. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133899>
- 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, & Soil Pollution*, 230(3), 72. <https://doi.org/10.1007/s11270-0194109-x>



INSTITUCIONES PARTICIPANTES



Secretaría Técnica Administrativa



Con el apoyo de:



www.fontagro.org

Correo electrónico: fontagro@fontagro.org