



EL DESAFÍO DEL CADMIO — EN EL — CACAO

Ciencia, Biotecnología
y Soluciones Naturales

AUTORES:

Rodríguez-Cevallos, Sanyi Lorena
Vásquez-Cortez, Luis Humberto
Cortez-Espinoza, Andrea Cristina
Zambrano-Muñoz, Denisse Margoth
Plua-Montiel, Jhoan Alfredo
Clavijo-Velázquez, Silvia Cristina



Grupo de Asesoría Empresarial & Académica
Grupoea.ecuador
Editorial Grupo AEA

El desafío del cadmio en cacao: Ciencia, biotecnología y soluciones naturales

Autor/es:

Rodríguez-Cevallos, Sanyi Lorena

Universidad Estatal de Milagro

Vásquez-Cortez, Luis Humberto

Universidad Técnica de Babahoyo; Universidad Nacional de Cuyo

Cortez-Espinoza, Andrea Cristina

Universidad Técnica Estatal de Quevedo

Zambrano-Muñoz, Denisse Margoth

Universidad Técnica Estatal de Quevedo

Plua-Montiel, Jhoan Alfredo

Universidad Técnica Estatal de Quevedo; Universidad Nacional de Cuyo

Clavijo-Velázquez, Silvia Cristina

Universidad Nacional de Cuyo

Datos de Catalogación Bibliográfica

Rodríguez-Cevallos, S. L.
Vásquez-Cortez, L. H.
Cortez-Espinoza, A. C.
Zambrano-Muñoz, D. M.
Plua-Montiel, J. A.
Clavijo-Velázquez, S. C.

El desafío del cadmio en cacao: Ciencia, biotecnología y soluciones naturales

Editorial Grupo AEA, Ecuador, 2026
ISBN: 978-9942-598-09-7
Formato: 210 cm X 270 cm

163 págs.



Publicado por Editorial Grupo AEA

Ecuador, Santo Domingo, Vía Quinindé, Urb. Portón del Río.

Contacto: +593 983652447; +593 985244607

Email: info@editorialgrupo-aea.com

<https://www.editorialgrupo-aea.com/>

Director General:	<i>Prof. César Casanova Villalba.</i>
Editor en Jefe:	<i>Prof. Giovanni Herrera Enríquez</i>
Editora Académica:	<i>Prof. Maybelline Jaqueline Herrera Sánchez</i>
Supervisor de Producción:	<i>Prof. José Luis Vera</i>
Diseño:	<i>Tnlgo. Oscar J. Ramírez P.</i>
Consejo Editorial	<i>Editorial Grupo AEA</i>

Primera Edición, 2026

D.R. © 2026 por Autores y Editorial Grupo AEA Ecuador.

Cámara Ecuatoriana del Libro con registro editorial No 708

Disponible para su descarga gratuita en <https://www.editorialgrupo-aea.com/>

Los contenidos de este libro pueden ser descargados, reproducidos difundidos e impresos con fines de estudio, investigación y docencia o para su utilización en productos o servicios no comerciales, siempre que se reconozca adecuadamente a los autores como fuente y titulares de los derechos de propiedad intelectual, sin que ello implique en modo alguno que aprueban las opiniones, productos o servicios resultantes. En el caso de contenidos que indiquen expresamente que proceden de terceros, deberán dirigirse a la fuente original indicada para gestionar los permisos.

Título del libro:

El desafío del cadmio en cacao: Ciencia, biotecnología y soluciones naturales

© Rodríguez-Cevallos, Sanyi Lorena; Vásquez-Cortez, Luis Humberto; Cortez-Espinoza, Andrea Cristina; Zambrano-Muñoz, Denisse Margoth; Plua-Montiel, Jhoan Alfredo; Clavijo-Velázquez, Silvia Cristina

© Marzo, 2026

Libro Digital, Primera Edición, 2026

Editado, Diseñado, Diagramado y Publicado por Comité Editorial del Grupo AEA, Santo Domingo de los Tsáchilas, Ecuador, 2026

ISBN: 978-9942-598-09-7



<https://doi.org/10.55813/egaea.l.158>

Como citar (APA 7ma Edición):

Rodríguez-Cevallos, S. L., Vásquez-Cortez, L. H., Cortez-Espinoza, A. C., Zambrano-Muñoz, D. M., Plua-Montiel, J. A., & Clavijo-Velázquez, S. C (2026). *El desafío del cadmio en cacao: Ciencia, biotecnología y soluciones naturales*. Editorial Grupo AEA. <https://doi.org/10.55813/egaea.l.158>

Cada uno de los textos de Editorial Grupo AEA han sido sometido a un proceso de evaluación por pares doble ciego externos (double-blindpaperreview) con base en la normativa del editorial.

Revisores:



Ing. Flores Mancheno César Escuela Superior Politécnica de
Iván, PhD. Chimborazo – Ecuador



Ing. Ramos Acuña Hebert Universidad Nacional de
Ernesto, Mgs. Huancavelica – Perú



Los libros publicados por “**Editorial Grupo AEA**” cuentan con varias indexaciones y repositorios internacionales lo que respalda la calidad de las obras. Lo puede revisar en los siguientes apartados:



Editorial Grupo AEA



<http://www.editorialgrupo-aea.com>



Editorial Grupo AeA



editorialgrupoea



Editorial Grupo AEA

Aviso Legal:

La información presentada, así como el contenido, fotografías, gráficos, cuadros, tablas y referencias de este manuscrito es de exclusiva responsabilidad del/los autor/es y no necesariamente reflejan el pensamiento de la Editorial Grupo AEA.

Derechos de autor ©

Este documento se publica bajo los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0).

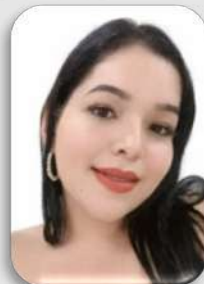


El “copyright” y todos los derechos de propiedad intelectual y/o industrial sobre el contenido de esta edición son propiedad de la Editorial Grupo AEA y sus Autores. Se prohíbe rigurosamente, bajo las sanciones en las leyes, la producción o almacenamiento total y/o parcial de esta obra, ni su tratamiento informático de la presente publicación, incluyendo el diseño de la portada, así como la transmisión de la misma de ninguna forma o por cualquier medio, tanto si es electrónico, como químico, mecánico, óptico, de grabación o bien de fotocopia, sin la autorización de los titulares del copyright, salvo cuando se realice confines académicos o científicos y estrictamente no comerciales y gratuitos, debiendo citar en todo caso a la editorial. Las opiniones expresadas en los capítulos son responsabilidad de los autores.

RESEÑA DE AUTORES

**Rodríguez-Cevallos, Sanyi Lorena**

Universidad Estatal de Milagro

srodriguezc17@unemi.edu.ec<https://orcid.org/0009-0003-4684-9587>

Ingeniera en Alimentos graduada en la Universidad Técnica Estatal de Quevedo. Actualmente cursa la Maestría en Ciencia y Tecnología de Alimentos en la Universidad Estatal de Milagro, fortaleciendo su formación científica y tecnológica en el área alimentaria. Su trayectoria académica se orienta a la investigación, innovación y calidad en alimentos, con participación activa en la producción científica. Es autora y coautora de libros, capítulos de libro y artículos publicados en revistas de impacto, contribuyendo al desarrollo del conocimiento en el ámbito agroindustrial y alimentario. Además, se desempeña como par evaluador de publicaciones académicas, aportando al aseguramiento de la calidad científica. Su labor integra rigor técnico, compromiso investigativo y proyección profesional hacia el desarrollo sostenible del sector alimentario. Ha realizado diplomado internacional en Docencia Superior y en Gestión de la Seguridad e Inocuidad Alimentaria, en la Universidad de Piura Perú.

**Vásquez-Cortez, Luis Humberto**Universidad Técnica de Babahoyo
Universidad Nacional de Cuyolvazquezc@utb.edu.ec<https://orcid.org/0000-0003-1850-0217>

Ingeniero en Alimentos y Magíster en Agroindustria, con una segunda Maestría en Agroindustria con especialización en Gestión de Calidad y Seguridad Alimentaria. Es egresado del Doctorado en Ingeniería de Productos y Procesos de la Industria Alimentaria por la Universidad Nacional de Cuyo (Argentina), actualmente cursa la Maestría en Ciencia y Tecnología de Alimentos en la Universidad Estatal de Milagro y posee formación avanzada en Ciencia y Tecnología de Alimentos y Ciencias Aplicadas. Ha realizado diplomados internacionales en Docencia Superior y en Gestión de la Seguridad e Inocuidad Alimentaria. Ha sido distinguido con el Doctorado Honoris Causa por la Asociación de Magísteres, Doctores y Posdoctores de Lima (Perú) y la Cátedra UNESCO, así como por la Universidad de Gestalt (México), en reconocimiento a su trayectoria académica. Actualmente es Docente Investigador en la Universidad Técnica de Babahoyo (Ecuador), donde desarrolla proyectos en agroindustria sostenible, biotecnología aplicada y calidad alimentaria. Es autor y coautor de publicaciones científicas, libros, capítulos de libros orientadas al desarrollo sostenible.

RESEÑA DE AUTORES



Cortez-Espinoza, Andrea Cristina



Universidad Técnica Estatal de Quevedo



acortez@uteq.edu.ec



<https://orcid.org/0009-0008-3241-6824>



Ingeniera en Industria Pecuarias, Magíster en Procesamiento de Alimentos, actualmente Docente Titular de la Carrera de Agroindustria de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo, me he desempeñado como analista de calidad y supervisora de producción en empresas como EL ORDEÑO, NIRSA, actualmente me dedico a la Docencia, la investigación y la vinculación, en temas enfocados en la valorización de residuos agrícolas, innovación alimentaria y sostenibilidad, contribuyendo a la formación de estudiantes y al desarrollo comunitario.



Zambrano-Muñoz, Denisse Margoth



Universidad Técnica Estatal de Quevedo



dzambranom@uteq.edu.ec



<https://orcid.org/0000-0002-2168-2130>



Se formo en la Universidad Técnica Estatal de Quevedo, donde obtuvo el título de Ingeniera Agroindustrial. Más adelante fortaleció su perfil académico con una Maestría en Agroalimentación, Producción y Tecnologías Agroalimentarias en la Universidad de Córdoba, España. Actualmente cursa el doctorado en Ingeniería Agraria, Alimentaria, Forestal y del Desarrollo Rural Sostenible en la Universidad de Córdoba y el IFAPA. En el ámbito profesional, se desempeña como docente en la Universidad Técnica Estatal de Quevedo, compartiendo conocimientos y experiencia en el sector agroalimentario. Además, participa activamente en investigación científica, especialmente en temas relacionados con compuestos bioactivos y sostenibilidad en la industria del cacao. Su trabajo ha contribuido al desarrollo de procesos innovadores orientados a mejorar la calidad y sostenibilidad agroindustrial.

RESEÑA DE AUTORES



Plua-Montiel, Jhoan Alfredo



Universidad Técnica Estatal de Quevedo
Universidad Nacional de Cuyo



jpluam@uteq.edu.ec



<https://orcid.org/0009-0006-3297-0564>



Ingeniero agroindustrial y licenciado en Gestión de Empresas por la Universidad Técnica Estatal de Quevedo. Posee un máster en Agroalimentación con especialidad en Producción y Tecnologías Agroalimentarias por la Universidad de Córdoba, España; es egresado de la Maestría en Biotecnología de la Universidad Estatal de Milagro y cursa el Doctorado en Ingeniería de Productos y Procesos de la Industria Alimentaria por la Universidad Nacional de Cuyo (Argentina). Actualmente se desempeña como docente a tiempo completo en la Universidad Técnica Estatal de Quevedo, en áreas relacionadas con investigación, diseño experimental. Su trayectoria académica y científica se enfoca en la agroindustria, los alimentos, los compuestos bioactivos y la sostenibilidad. Ha publicado en revistas científicas indexadas de alto impacto, participado en congresos y proyectos de investigación y de vinculación con la sociedad, y ha recibido reconocimientos por su destacada labor investigativa, consolidando un perfil profesional comprometido con la generación y difusión del conocimiento.



Clavijo-Velázquez, Silvia Cristina



Universidad Nacional de Cuyo



scclavijo@fcai.uncu.edu.ar



<https://orcid.org/0009-0002-7444-9014>



Profesora en Ciencias Químicas. Ingeniera Química especializada en mineralurgia. Magister en Enseñanza de la Matemática. Doctora en Ingeniería por la Universidad Nacional de Cuyo. Se desempeña como Directora de Posgrado y vicedirectora de la Unidad Ejecutora del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas ICAI. Su línea de trabajo incluye el desarrollo de recubrimientos a través de la técnica de deposición electroforética y de películas delgadas por deposición electrolítica.

Índice

Reseña de Autores.....	ix
Índice.....	xiii
Índice de Tablas.....	xvii
Índice de Figuras.....	xvii
Introducción.....	xix
Capítulo I: Marco teórico de la investigación.....	1
1.1. Antecedentes.....	3
1.2. Denominación taxonómica.....	4
1.3. Condiciones Ecológicas del cacao.....	5
1.4. Variedades de cacao.....	6
1.4.1. Cacao Criollo.....	6
1.4.2. Cacao Forastero.....	7
1.4.3. Cacao Trinitario.....	8
1.4.4. Cacao Nacional.....	9
1.5. Mazorca de cacao (Fruto).....	10
1.5.1. Almendras de cacao.....	11
1.6. Etapas de postcosecha en el cacao.....	12
1.6.1. Alternativas de fermentación.....	14
1.6.2. Etapas fermentativas de cacao.....	16
1.6.3. Remociones.....	18
1.6.4. Fase alcohólica.....	19
1.6.5. Fase acética.....	20
1.6.6. Fase oxidativa.....	21
1.7. Pérdida de humedad (Secado).....	21
1.8. Calidad de las almendras de cacao.....	23

1.9.	Estado fermentativo (Prueba de corte)	24
1.10.	Clasificación de almendras de cacao	25
1.10.1.	Bien fermentadas	25
1.10.2.	Medianas fermentadas	25
1.10.3.	Violetas	26
1.10.4.	Pizarras	27
1.10.5.	Mohosas	27
1.10.6.	Daños físicos de la almendra de cacao	28
1.11.	Calidad química de las almendras de cacao	29
1.12.	Almacenamiento de almendras de cacao	30
1.13.	Trasporte de las almendras de cacao	32
1.14.	Enzimas (Polifenol oxidasa)	33
1.14.1.	Polifenol presente en el banano	34
1.14.2.	Polifenol de manzana	36
1.15.	El cadmio	37
1.15.1.	Forma de contaminación por cadmio en el suelo.	38
1.16.	Estrategias biológicas para la mitigación del cadmio	40
1.17.	La biorremediación	41
1.18.	La fitorremediación	43
1.19.	Las enmiendas del suelo	45
1.20.	Biochar	47
1.21.	Proceso de postcosecha del cacao	49
1.21.1.	Cadmio en el Ecuador	50
1.22.	Uso de microorganismos	55
1.22.1.	Levaduras (<i>Saccharomyces cerevisiae</i>)	56
1.22.2.	<i>Lactobacillus Casei</i>	57
1.22.3.	<i>Azospirillum brasilense</i>	59

1.22.4.	Azotobacter chroococcum.....	60
1.22.5.	Lactobacillus acidophilus.....	61
1.22.6.	Rhizobiun japonicum.....	62
Capítulo II: Diseño metodológico		65
2.1.	Localización	67
2.2.	Tipo de investigación	68
2.2.1.	Método Descriptivo	68
2.2.2.	Método Explicativo.....	68
2.3.	Métodos de investigación	69
2.3.1.	Método Inductivo	69
2.3.2.	Método Estadístico	70
2.3.3.	Método Experimental.....	71
2.4.	Fuentes de recopilación de información	71
2.5.	Diseño de investigación	72
2.5.1.	Esquema de ANDEVA.....	73
2.5.2.	Arreglo de tratamiento.	74
2.5.3.	Modelo matemático	74
2.6.	Instrumento de Investigación	76
2.6.1.	Variables estudiadas	76
2.6.1.1.	Ejecución de la postcosecha	76
2.6.1.2.	Morfología de evaluación de las mazorcas de cacao.....	78
2.6.1.2.1.	Peso del fruto de cacao.....	78
2.6.1.2.2.	Número de almendras de cacao.	78
2.6.1.2.3.	Largo del fruto de cacao.....	79
2.6.1.2.4.	Diámetro del fruto de cacao	79
2.6.1.3.	Proceso de fermentación.....	80
2.6.1.4.	Adición de Microorganismos	80

2.6.1.4.1. Albiobacth.....	81
2.6.1.4.2. Comercial	82
2.6.1.5. Dosis de aplicación de microorganismos	82
2.6.1.6. Adición de Extracto de frutas (Banano y Manzana)	83
2.6.1.6.1. Preparación de Extracto de frutas Banano	83
2.6.1.6.2. Preparación de Extracto de frutas manzana	84
2.6.1.7. Determinación de pH.....	85
2.6.1.8. Determinación de °Brix.....	86
2.6.1.9. Determinación de Temperatura.....	86
2.6.1.10. Secado de las almendras de cacao	86
2.6.1.11. Almacenamiento de las almendras de cacao.....	87
2.6.1.12. Índice de mazorca	87
2.6.1.13. Índice de semilla.....	87
2.6.1.14. Prueba de testa y cotiledón	87
2.6.1.15. Prueba de corte	88
2.6.1.16. Peso de habas de cacao en 100 gramos	88
2.6.1.17. Humedad	88
2.6.1.18. Muestreo método cuartil.	89
2.6.1.19. Determinación de Cadmio	90
Capítulo III: Resultados	93
3.1. Variables físicos-químicas	95
3.1.1. Variables iniciales de la mazorca	95
3.2. pH	98
3.3. Gados Brix	103
3.4. Temperatura	106
3.5. Variables físicas (prueba de corte)	110
3.6. Variable química cadmio.....	114

3.7. Conclusiones	119
3.8. Recomendaciones	120
Referencias Bibliográficas	121

Índice de Tablas

Tabla 1 <i>Principales componentes nutricionales del plátano</i>	35
Tabla 2 <i>Composición nutricional de la manzana</i>	37
Tabla 3 <i>Estructura de Andeva</i>	73
Tabla 4 <i>Factores y niveles de estudio</i>	74
Tabla 5 <i>Arreglo de tratamientos de estudios</i>	74
Tabla 6 <i>Registro fotográfico de la obtención de mazorcas de cacao</i>	77
Tabla 7 <i>Procedimiento para el análisis de humedad en granos de cacao</i>	89

Índice de Figuras

Figura 1 <i>Theobroma cacao L. variedad criolla</i>	7
Figura 2 <i>Variedad de cacao Foraster</i>	8
Figura 3 <i>Variedad de cacao Trinitario</i>	9
Figura 4 <i>Variedad de cacao Nacional</i>	10
Figura 5 <i>Mazorca de cacao con vista a su interior</i>	11
Figura 6 <i>Esquema gráfico de la etapa de postcosecha</i>	14
Figura 7 <i>Alternativas de fermentación de cacao utilizadas en sistemas tradicionales y tecnificados</i>	16
Figura 8 <i>Cambios morfológicos de las almendras de cacao durante el proceso de fermentación y secado (Theobroma cacao L.)</i>	18
Figura 9 <i>Esquemmatización de la absorción de cadmio</i>	40
Figura 10 <i>Distribución geográfica de la concentración de cadmio en almendras de cacao</i>	55
Figura 11 <i>Consorcio microbiano ALBIOBACTI®</i>	82
Figura 12 <i>Distribución de tratamientos en la masa fermentativa</i>	83

Figura 13 <i>Método de Cadmio se realizó con 3050B de USDAP</i>	91
Figura 14 <i>Efecto de la interacción de Provincia (Esmeraldas y Manabí) A</i>	98
Figura 15 <i>Efecto de la interacción de Provincia (Esmeraldas y Manabí) B</i>	102
Figura 16 <i>Efecto de la interacción de Provincia (Esmeraldas y Manabí) C</i> ...	106
Figura 17 <i>Efecto de la interacción de Provincia (Esmeraldas y Manabí) D</i> ...	109
Figura 18 <i>Efecto de la interacción de Provincia (Esmeraldas y Manabí) E</i>	114
Figura 19 <i>Efecto de la interacción de Provincia (Esmeraldas y Manabí) F</i>	117
Figura 20 <i>Análisis de Cadmio por tratamiento, Provincias Manabí y Esmeraldas</i>	119

Introducción

El cacao constituye uno de los cultivos tropicales de mayor relevancia histórica, económica y cultural a nivel mundial. Dentro del género *Theobroma cacao*, cuyo nombre significa literalmente “alimento de los dioses”, se agrupan diversas especies pertenecientes a la familia *Malvaceae*, las cuales han sido aprovechadas por las civilizaciones humanas desde tiempos precolombinos.

En América Latina, el cacao ha tenido una profunda relación con la historia de las civilizaciones mesoamericanas y andinas. Antes de la colonización europea, pueblos como los mayas, aztecas y diversas culturas amazónicas ya utilizaban el cacao para la elaboración de bebidas rituales, intercambios comerciales y ceremonias religiosas. En este contexto, el cacao no solo representaba un alimento energético, sino también un símbolo de valor cultural y espiritual. Con la llegada de los europeos en el siglo XVI, el cacao fue introducido en los mercados internacionales, transformándose progresivamente en una de las materias primas agrícolas más importantes del comercio global.

En el caso de Ecuador, el cacao ocupa un lugar central dentro de la historia económica del país. Durante el siglo XVIII y especialmente a finales del siglo XIX, Ecuador se consolidó como uno de los principales productores mundiales de cacao fino de aroma, variedad reconocida por su perfil sensorial distintivo caracterizado por notas florales, frutales y complejas. Este periodo histórico fue conocido como el primer boom cacaotero ecuatoriano, el cual tuvo lugar aproximadamente entre 1870 y 1920. Durante esta etapa, el cacao ecuatoriano dominó los mercados internacionales, generando una importante expansión económica, especialmente en las regiones costeras del país, donde se establecieron grandes haciendas dedicadas al cultivo y exportación del grano.

Este auge económico estuvo asociado principalmente al cultivo del denominado cacao Nacional, una variedad tradicional altamente apreciada por la industria chocolatera europea. Sin embargo, factores como enfermedades fitosanitarias, cambios en la demanda internacional y la competencia de otros países

productores provocaron una disminución significativa en la producción nacional durante las primeras décadas del siglo XX.

Posteriormente, a finales del siglo XX y principios del siglo XXI, Ecuador experimentó un segundo periodo de expansión cacaotera, impulsado por la introducción de clones de alto rendimiento como CCN-51, los cuales presentan mayor productividad y resistencia frente a ciertas enfermedades. Esta variedad permitió incrementar significativamente la producción nacional, consolidando nuevamente al país como uno de los principales exportadores de cacao en el mundo. Actualmente, Ecuador se posiciona como el principal productor global de cacao fino de aroma, representando aproximadamente más del 60 % de este tipo de cacao a nivel mundial.

En los últimos años, el mercado internacional del cacao ha experimentado importantes fluctuaciones. Durante 2024 y especialmente en 2025, el precio internacional del cacao alcanzó niveles históricamente altos, debido a una combinación de factores globales que incluyeron reducción de la producción en África Occidental, cambios climáticos extremos, aumento de enfermedades en plantaciones y una creciente demanda mundial de chocolate de alta calidad. Este escenario generó un incremento considerable en el valor del cacao en los mercados internacionales, beneficiando temporalmente a los productores latinoamericanos, incluyendo a los ecuatorianos.

No obstante, hacia 2026, el mercado comenzó a mostrar una corrección en los precios internacionales, resultado del reajuste en la oferta global, la recuperación parcial de la producción en algunos países africanos y las dinámicas propias de los mercados agrícolas internacionales. Esta disminución en los precios ha generado nuevas reflexiones dentro del sector cacaotero, particularmente en relación con la necesidad de fortalecer la calidad del grano, la innovación tecnológica en postcosecha y la sostenibilidad de los sistemas productivos, con el fin de mantener la competitividad del cacao ecuatoriano en el mercado global.

En este contexto, la investigación científica juega un papel fundamental para mejorar la calidad y seguridad del cacao. Uno de los principales desafíos actuales en la producción cacaotera es la presencia de metales pesados, especialmente cadmio (Cd^{2+}), en los granos de cacao, fenómeno que ha

generado preocupaciones en los mercados internacionales debido a las regulaciones establecidas por organismos como la European Food Safety Authority y el Codex Alimentarius Commission. Estas regulaciones buscan garantizar la inocuidad de los productos alimentarios, estableciendo límites máximos permisibles para la presencia de metales pesados en cacao y chocolate.

Ante esta problemática, diversas investigaciones recientes han explorado alternativas biotecnológicas para reducir la concentración de cadmio en las almendras de cacao. Entre estas estrategias destacan la utilización de microorganismos eficientes durante la fermentación, así como el empleo de extractos vegetales con actividad enzimática y antioxidante, los cuales pueden favorecer procesos de transformación bioquímica y posibles mecanismos de inmovilización o reducción de metales pesados durante la etapa postcosecha.

La fermentación del cacao constituye una fase crítica dentro del proceso postcosecha, ya que durante este periodo ocurren múltiples transformaciones microbiológicas y bioquímicas que influyen directamente en la calidad final del grano. Durante esta etapa, comunidades microbianas compuestas por levaduras, bacterias lácticas y bacterias acéticas participan activamente en la degradación de azúcares, la generación de ácidos orgánicos, el aumento de la temperatura y la modificación del pH del grano. Estos procesos no solo contribuyen al desarrollo de precursores de aroma y sabor, sino que también pueden influir en la dinámica de ciertos compuestos químicos presentes en la almendra.

Por esta razón, el estudio de estrategias fermentativas innovadoras, como la aplicación de consorcios microbianos o extractos naturales ricos en enzimas oxidativas, representa una línea de investigación de gran interés para la ciencia de los alimentos y la agroindustria cacaotera. Estas tecnologías emergentes no solo tienen el potencial de mejorar la calidad sensorial del cacao, sino también de contribuir a la mitigación de contaminantes químicos, fortaleciendo la sostenibilidad y seguridad del producto.

En consecuencia, el desarrollo de investigaciones que integren aspectos agronómicos, microbiológicos, bioquímicos y tecnológicos resulta fundamental

para el futuro del cacao ecuatoriano. Comprender la interacción entre microorganismos, procesos fermentativos y la composición química del grano permitirá diseñar estrategias más eficientes para mejorar la calidad del cacao y garantizar su aceptación en los mercados internacionales.

En este sentido, el presente trabajo se enmarca dentro de los esfuerzos científicos orientados a optimizar los procesos de fermentación del cacao mediante la aplicación de microorganismos eficientes y extractos naturales, con el objetivo de mejorar los parámetros fisicoquímicos del grano y contribuir a la reducción del contenido de cadmio en las almendras de cacao producidas en Ecuador.

La especie *Theobroma cacao* L. constituye uno de los cultivos tropicales de mayor relevancia dentro del sistema agroalimentario mundial, debido a su importancia como materia prima fundamental para la elaboración de chocolate y una amplia variedad de productos derivados de alto valor comercial. A nivel global, el cacao desempeña un papel clave en la economía agrícola de numerosos países tropicales, donde su producción representa una fuente importante de ingresos, empleo rural y desarrollo socioeconómico.

En Ecuador, el cultivo de cacao posee una relevancia histórica, económica y social significativa, consolidándose como uno de los principales productos agrícolas de exportación no petrolera. La producción cacaotera ecuatoriana sustenta a miles de pequeños y medianos productores distribuidos principalmente en las regiones Costa y Amazonía, quienes dependen de esta actividad para su subsistencia. Además, el país es ampliamente reconocido en el mercado internacional por la producción de cacao fino de aroma, un tipo de cacao altamente valorado por la industria chocolatera debido a sus características sensoriales únicas, particularmente su complejidad aromática, notas florales y perfil organoléptico diferenciado.

Desde el punto de vista económico, el cacao representa uno de los productos estratégicos dentro del comercio exterior ecuatoriano. En los últimos años, la demanda internacional de cacao y chocolate ha experimentado un crecimiento sostenido, impulsado por el aumento del consumo en mercados tradicionales como Europa y América del Norte, así como por la expansión del mercado en

economías emergentes. Este incremento en la demanda ha contribuido a una tendencia alcista en los precios internacionales del cacao, los cuales han alcanzado niveles históricamente elevados en los mercados globales, incrementando el valor económico del cultivo y fortaleciendo su importancia dentro de la economía agrícola nacional.

A escala global, la producción de cacao se concentra principalmente en regiones tropicales ubicadas en África, América Latina y Asia. Entre los principales países productores destaca Costa de Marfil, que aporta aproximadamente un tercio de la producción mundial de cacao, seguida por otros países africanos como Ghana. En el continente americano, Ecuador y Brasil se posicionan como actores relevantes dentro del mercado internacional, contribuyendo significativamente al suministro global de cacao utilizado por la industria chocolatera (Peláez et al., 2016; Quintero & Morales, 2004).

A pesar de su importancia económica y comercial, la cadena productiva del cacao enfrenta actualmente diversos desafíos relacionados con la inocuidad y calidad del producto, entre los cuales destaca la presencia de metales pesados, particularmente cadmio (Cd) y plomo (Pb), en los granos de cacao. La presencia de estos elementos potencialmente tóxicos representa un problema creciente para los países productores, ya que puede generar restricciones comerciales en mercados internacionales que aplican estrictas regulaciones de seguridad alimentaria.

Estos contaminantes pueden incorporarse al sistema agrícola a través de diferentes fuentes, incluyendo características naturales del suelo, material parental, condiciones edáficas específicas o actividades antropogénicas. Posteriormente, estos elementos pueden permanecer en las almendras durante las etapas de procesamiento industrial, lo que permite que sean detectados en productos finales como el chocolate y otros derivados. Esta situación ha generado preocupación en los mercados internacionales debido a los posibles riesgos asociados con la exposición prolongada a metales pesados en la dieta humana.

En respuesta a esta problemática, diversos países importadores han implementado normativas internacionales que regulan los niveles máximos

permitidos de contaminantes en alimentos, con el objetivo de proteger la salud de los consumidores y garantizar la inocuidad de los productos alimentarios. Estas regulaciones buscan asegurar que los productos derivados del cacao cumplan con estándares internacionales de calidad, evitando riesgos asociados al consumo prolongado de contaminantes presentes en la cadena alimentaria (Arévalo et al., 2017).

En este contexto, la Unión Europea, uno de los principales mercados importadores de cacao y chocolate, ha establecido regulaciones específicas para controlar la presencia de metales pesados en alimentos. Actualmente, el Reglamento (UE) 2023/915 establece los límites máximos permitidos de contaminantes en productos alimenticios, incluyendo el cadmio en productos derivados del cacao. Según esta normativa, el contenido máximo permitido de cadmio en chocolate con un contenido de sólidos de cacao entre 50 % y 70 % o superior no debe exceder $0,80 \text{ mg kg}^{-1}$. Asimismo, se establecen límites diferenciados dependiendo del tipo de producto, como $0,30 \text{ mg kg}^{-1}$ para chocolates con menor contenido de cacao y $0,60 \text{ mg kg}^{-1}$ para cacao en polvo destinado al consumidor final.

Estas regulaciones han sido implementadas con el propósito de reducir la exposición de los consumidores a este metal potencialmente tóxico, considerando que el cadmio puede bioacumularse en el organismo humano tras exposiciones prolongadas. En consecuencia, los países productores de cacao enfrentan el desafío de desarrollar estrategias que permitan disminuir la concentración de este contaminante en los granos, garantizando así el cumplimiento de los estándares internacionales y evitando posibles restricciones en el comercio global del cacao (Comisión Europea, 2023).

El cadmio (Cd) es un elemento traza clasificado dentro del grupo de los metales pesados que se encuentra de forma natural en la corteza terrestre y participa en diversos procesos geoquímicos dentro de los ecosistemas. En determinadas zonas productoras de cacao en Ecuador se han reportado concentraciones relativamente elevadas de este metal tanto en suelos como en granos de cacao, en algunos casos superiores a 1 mg kg^{-1} . Investigaciones realizadas en regiones cacaoteras de la costa ecuatoriana, particularmente en las provincias de El Oro,

Esmeraldas, Manabí y Guayas, han evidenciado niveles elevados de cadmio asociados principalmente a características geológicas de los suelos y a procesos naturales de acumulación del metal.

En la región amazónica, por otro lado, se han identificado áreas con presencia significativa de este contaminante relacionadas con actividades extractivas, especialmente la explotación minera. La presencia de cadmio en los sistemas agrícolas puede estar influenciada tanto por factores geogénicos como por factores antrópicos. Entre estos últimos destacan el uso de fertilizantes fosfatados que contienen trazas de metales pesados, así como las emisiones provenientes de procesos industriales y metalúrgicos. En estos procesos, el cadmio suele liberarse como subproducto durante la obtención y refinación de metales como zinc (Zn), cobre (Cu) y plomo (Pb), lo que favorece su dispersión en el ambiente y su posterior incorporación en los suelos agrícolas (McLaughlin et al., 2019).

La incorporación de cadmio en *Theobroma cacao L.* ocurre principalmente a través del sistema radicular, desde donde el metal es absorbido junto con la solución del suelo. Posteriormente, puede movilizarse a través del sistema vascular de la planta hacia diferentes órganos vegetativos y reproductivos, incluyendo tallos, hojas, flores y frutos. Como resultado de este proceso de translocación, el cadmio puede acumularse en las almendras de cacao, particularmente en estructuras como la testa y los cotiledones, que constituyen la materia prima utilizada en la industria chocolatera (Florida, 2021).

La presencia de este tipo de contaminantes bioacumulables representa un riesgo potencial para la salud humana, ya que pueden ingresar a la cadena alimentaria a través del consumo de productos derivados del cacao. La exposición prolongada a niveles elevados de cadmio se ha asociado con diversos efectos adversos en los organismos vivos, lo que ha motivado el desarrollo de estrategias orientadas a reducir su acumulación en los sistemas agrícolas y a controlar su presencia en alimentos (Reyes et al., 2016).

Dentro del manejo postcosecha del cacao, el proceso de fermentación constituye una etapa fundamental, ya que durante esta fase ocurren transformaciones bioquímicas y microbiológicas que favorecen la formación de compuestos

precusores responsables del aroma y sabor característicos del chocolate. Estos cambios metabólicos contribuyen significativamente a mejorar las propiedades sensoriales del grano y, por tanto, la calidad del producto final utilizado por la industria chocolatera.

No obstante, el proceso fermentativo también representa una oportunidad para incorporar estrategias biotecnológicas innovadoras orientadas a mejorar la inocuidad del cacao. La aplicación de enfoques microbiológicos durante la fermentación podría contribuir a reducir la presencia de contaminantes, fortaleciendo la seguridad alimentaria y garantizando la calidad de los productos derivados del cacao destinados al consumo humano (Vera, 2016).

En este contexto, surge la necesidad de evaluar alternativas biotecnológicas aplicadas durante la fermentación del cacao que permitan disminuir la presencia de metales pesados en las almendras. Una de las estrategias propuestas consiste en la utilización de consorcios microbianos comerciales, como Albiobatch y COMERCIAL, combinados con extractos frutales de banano (*Musa spp.*) y manzana (*Malus domestica*), los cuales pueden aportar compuestos orgánicos capaces de estimular la actividad microbiana dentro de la masa fermentativa.

La aplicación de estos tratamientos durante el proceso fermentativo de almendras de *Theobroma cacao L.* se plantea como un enfoque experimental orientado a reducir la concentración de metales pesados, particularmente cadmio, mediante mecanismos microbiológicos y bioquímicos asociados a procesos de adsorción, complicación o inmovilización del metal. Este estudio fue desarrollado en dos unidades productivas cacaoteras ubicadas en la región costera del Ecuador, con el propósito de generar evidencia científica que contribuya al desarrollo de estrategias postcosecha más seguras, sostenibles y competitivas para la cadena productiva del cacao.

La cadena cacaotera ecuatoriana posee una notable relevancia económica, social y productiva, debido a que el país se ha consolidado como uno de los principales referentes internacionales en la producción y exportación de cacao de alta calidad. Este reconocimiento se sustenta en las sobresalientes características sensoriales del grano, especialmente su perfil aromático, su

calidad física y su valor para la industria chocolatera especializada. En este contexto, el cacao constituye una fuente esencial de ingresos para miles de pequeños, medianos y grandes productores, cuyo sustento económico depende directamente de esta actividad agrícola.

Sin embargo, a pesar de la importancia estratégica de este cultivo, la presencia de cadmio en las almendras representa una limitante crítica para la comercialización del cacao ecuatoriano en mercados internacionales cada vez más exigentes en términos de inocuidad alimentaria. Esta problemática no solo compromete la competitividad del sector exportador, sino que también afecta de manera directa la estabilidad económica de las familias productoras, generando un escenario de alta preocupación para la sostenibilidad de la cadena productiva.

Frente a esta situación, surge la necesidad de desarrollar alternativas biotecnológicas que permitan reducir la concentración de este metal durante las etapas postcosecha del cacao. En este sentido, se plantea la siguiente pregunta de investigación: ¿Es posible disminuir los niveles de cadmio en almendras de cacao mediante la aplicación de microorganismos eficientes (EM) y la adición de extractos de banano y manzana sobre la masa fermentativa?

Agradecimiento:

Los autores expresan su profundo agradecimiento a Dios, por ser guía y fortaleza constante a lo largo del desarrollo de esta obra. Asimismo, manifiesta un especial reconocimiento al Ing. Victor Lovani Castro Triana, Especialista en Agricultura Tropical Sostenible por su valioso apoyo técnico y acompañamiento en la ejecución de la fase experimental, cuyo aporte fue fundamental para la consolidación de los resultados presentados. De igual manera, se agradece a la empresa ALICOS S.A., con su producto ALBIOBATCH bajo la dirección del Ing. Victor Lovani Castro Triana, por el respaldo brindado, los recursos facilitados y la confianza depositada en el desarrollo de esta investigación.

The background features a light blue and white geometric pattern with overlapping squares and triangles. In the bottom right corner, there is a faint, stylized molecular structure composed of grey circles connected by thin lines.

CAPITULO 1

MARCO TEÓRICO DE LA INVESTIGACIÓN

Marco teórico de la investigación

1.1. Antecedentes

En las últimas décadas, el cacao (*Theobroma cacao* L.) se ha consolidado como una de las materias primas agrícolas de mayor relevancia dentro del comercio internacional, debido a su amplia demanda en la industria alimentaria, especialmente en la producción de chocolate y productos derivados. Este cultivo constituye además una fuente fundamental de ingresos para pequeños, medianos y grandes productores, lo que ha permitido el desarrollo de importantes sistemas productivos en diversas regiones tropicales del mundo. Como consecuencia del denominado “boom cacaotero”, la expansión del cultivo se extendió hacia diferentes continentes, impulsando el crecimiento del mercado internacional del cacao y fortaleciendo su importancia económica dentro del sector agrícola global (Cruz & Pereira, 2009).

En Ecuador, la producción de cacao se desarrolló inicialmente gracias a las condiciones agroecológicas favorables del territorio, caracterizadas por suelos fértiles, clima tropical y abundantes recursos naturales que permitieron el establecimiento de extensas plantaciones cacaoteras. Actualmente, el país es reconocido a nivel internacional por la producción de cacao fino de aroma, una variedad altamente apreciada por sus cualidades sensoriales y su perfil organoléptico distintivo. Se estima que Ecuador exporta aproximadamente el 63 % del cacao fino de aroma a nivel mundial, lo que refleja la importancia de esta variedad dentro del mercado internacional, particularmente en países europeos donde su calidad es altamente valorada (Perea et al., 2019).

A escala global, Ecuador se posiciona entre los principales exportadores de cacao, ocupando un lugar destacado dentro del comercio internacional gracias a la calidad de su grano. El país cuenta con aproximadamente 600.000 hectáreas dedicadas al cultivo de cacao, distribuidas principalmente en las regiones Costa y Amazonía. Entre las provincias con mayor producción destacan Los Ríos, con alrededor de 81.578 toneladas, seguida por Guayas con aproximadamente 60.200 toneladas, Manabí con cerca de 50.000 toneladas, y Esmeraldas con

alrededor de 40.000 toneladas. Estas zonas productoras contribuyen significativamente al volumen total de cacao exportado por el país, consolidando a Ecuador como uno de los principales actores dentro de la cadena global del cacao (Poma & Quezada, 2022).

No obstante, a pesar del reconocimiento internacional del cacao ecuatoriano, el sector enfrenta actualmente importantes desafíos relacionados con la presencia de metales pesados, particularmente cadmio, en las almendras de cacao. Con el fin de proteger la salud de los consumidores, la Unión Europea, a través de su normativa de seguridad alimentaria, ha establecido límites máximos permisibles para la presencia de este metal en productos derivados del cacao. En este sentido, el Reglamento (UE) 2021/1323 establece que el contenido máximo permitido de cadmio en productos de cacao y chocolate con alto contenido de sólidos de cacao no debe superar $0,80 \text{ mg kg}^{-1}$.

La implementación de estas regulaciones ha generado preocupación dentro del sector cacaotero, ya que la presencia de cadmio en las almendras fermentadas y secas puede afectar la comercialización del cacao en mercados internacionales altamente regulados. En consecuencia, la identificación de estrategias que permitan reducir la concentración de este metal pesado en los granos de cacao se ha convertido en una prioridad para garantizar la competitividad, sostenibilidad e inocuidad del cacao ecuatoriano en el comercio internacional (Abad et al., 2020).

1.2. Denominación taxonómica

El cacao (*Theobroma cacao* L.) es una especie vegetal perteneciente a la familia *Malvaceae*, dentro del género *Theobroma*, el cual comprende aproximadamente 20 especies distribuidas principalmente en regiones tropicales de América (Baudilio & Cumana, 2005). Esta planta ha sido ampliamente estudiada debido a su importancia económica, cultural y alimentaria, ya que constituye la materia prima fundamental para la elaboración de chocolate y otros productos derivados.

El origen del cacao se asocia con la región de la alta Amazonía, donde diversas investigaciones arqueológicas han evidenciado la presencia temprana de esta

especie en antiguas civilizaciones precolombinas. Uno de los hallazgos más relevantes corresponde al sitio arqueológico Santa Ana–La Florida, ubicado a aproximadamente 1.040 m s. n. m. en el cantón Palanda, provincia de Zamora Chinchipe, Ecuador. Los estudios realizados en este yacimiento han permitido identificar evidencias del uso del *Theobroma cacao* L. por parte de la cultura Mayo-Chinchipe, cuya antigüedad se remonta aproximadamente al 3300 a. C., lo que sugiere que el cacao formó parte de las prácticas culturales y alimentarias de estas poblaciones ancestrales (Paredes et al., 2022).

1.3. Condiciones Ecológicas del cacao

Los productores reconocen que el cultivo de *Theobroma cacao* L. constituye una actividad agrícola con una importante cadena de valor agroindustrial, debido a la elevada demanda internacional de esta materia prima utilizada principalmente en la industria chocolatera. Se estima que el consumo mundial de cacao continúa en crecimiento, lo que ha fortalecido su importancia económica dentro de los sistemas productivos tropicales. No obstante, a pesar del incremento sostenido de la demanda, la producción cacaotera enfrenta desafíos asociados a la presencia de cadmio en los granos, situación que genera preocupación tanto en el ámbito comercial como en el sanitario. A pesar de esta problemática, los agricultores continúan apostando por el cultivo de cacao debido a su relevancia económica y a su papel como sustento para miles de familias rurales. En este contexto, la reducción de los niveles de cadmio se ha convertido en un tema de interés nacional, ya que está directamente relacionado con la seguridad alimentaria, la competitividad del producto y la protección de la salud de los consumidores (Chancay et al., 2022).

En Ecuador, el cultivo de *Theobroma cacao* L. puede desarrollarse hasta altitudes cercanas a 1.400 m s. n. m., aunque las condiciones agroecológicas más favorables para su establecimiento se encuentran generalmente entre 400 y 800 m s. n. m.. El desarrollo adecuado de la planta requiere de precipitaciones bien distribuidas a lo largo del año, con valores que oscilan entre 1.250 y 3.000 mm anuales. Asimismo, el cacao presenta requerimientos térmicos específicos, con temperaturas mínimas entre 18 y 21 °C, temperaturas máximas entre 30 y

32 °C, y un rango óptimo cercano a 25–26 °C. Además, el cultivo se desarrolla de manera favorable en ambientes con humedad relativa entre 70 % y 90 %, siendo aproximadamente 80 % el nivel más adecuado para su crecimiento y producción (Almeida & Valle, 2007).

1.4. Variedades de cacao

1.4.1.Cacao Criollo

El término cacao criollo tiene su origen en la época colonial, cuando los conquistadores españoles denominaron “criollo” a los materiales de cacao que se cultivaban en América y que eran considerados propios o nativos de la región. Históricamente, este tipo de cacao se desarrolló principalmente en Venezuela, México, América Central y la región norte de Sudamérica, zonas que fueron reconocidas como centros tradicionales de producción de cacao de alta calidad (Méndez, 2015). Con el tiempo, el cacao criollo adquirió gran prestigio dentro del mercado internacional debido a sus características sensoriales superiores y su uso en la elaboración de chocolates finos.

Desde el punto de vista morfológico y agronómico, el cacao criollo se distingue por presentar flores de tonalidades rosadas y mazorcas generalmente alargadas, con aproximadamente diez surcos profundos y rugosos en su superficie. Durante su maduración, las mazorcas pueden adquirir tonalidades amarillas o amarillo-anaranjadas, mientras que las semillas o almendras presentan una coloración blanquecina o ligeramente violácea. Estas características, junto con su bajo contenido de compuestos amargos y su aroma delicado, hacen que este tipo de cacao sea altamente valorado en la industria chocolatera.

Además, el cacao criollo es reconocido por su perfil aromático complejo y suave, con menor astringencia y amargor en comparación con otras variedades de cacao, lo que lo convierte en una materia prima ideal para la producción de chocolates de alta calidad o denominados “cacao fino de aroma”. No obstante, a pesar de su excelente calidad sensorial, esta variedad es menos productiva y más susceptible a enfermedades, lo que limita su presencia dentro de la

producción mundial de cacao, representando solo una pequeña fracción del total cultivado a nivel global (Vera *et al.*, 2014).

Figura 1

Theobroma cacao L. variedad criolla



Nota: (Autores, 2026).

1.4.2.Cacao Forastero

El cacao Forastero constituye una de las variedades más ampliamente cultivadas a nivel mundial, representando aproximadamente el 80 % de la producción global de cacao, especialmente en países de África occidental, donde se concentra la mayor parte de su cultivo (Graziani *et al.*, 2012). Esta variedad se caracteriza por su alta productividad, mayor resistencia a enfermedades y buena adaptación a diferentes condiciones agroecológicas, lo que ha favorecido su expansión dentro de los sistemas de producción cacaotera.

Desde el punto de vista morfológico, el cacao Forastero presenta almendras de color violeta o púrpura, las cuales poseen mayor contenido de compuestos fenólicos en comparación con otras variedades. Las mazorcas, al alcanzar su madurez fisiológica, suelen adquirir tonalidades amarillentas o amarillo-verdosas, con una superficie menos rugosa y surcos poco pronunciados. Asimismo, la cáscara del fruto suele ser más gruesa y resistente, lo que contribuye a una mayor protección de las semillas durante el desarrollo del fruto.

En cuanto al proceso poscosecha, las almendras de cacao Forastero generalmente requieren un periodo de fermentación que oscila entre cinco y siete días, dependiendo de las condiciones ambientales y del método de fermentación utilizado. Este proceso permite el desarrollo de los precursores de aroma y sabor

característicos del cacao, contribuyendo al mejoramiento de la calidad del grano destinado a la industria chocolatera (Graziani et al., 2012).

Figura 2

Variedad de cacao Foraster



Nota: (Autores, 2026).

1.4.3.Cacao Trinitario

El cacao Trinitario es considerado una variedad híbrida que surgió a partir del cruce entre materiales Criollo y Forastero, originado en la isla de Trinidad durante el periodo colonial. Esta variedad se desarrolló como resultado de procesos naturales de hibridación que buscaban combinar la alta calidad sensorial del cacao Criollo con la mayor resistencia y productividad del cacao Forastero, lo que ha permitido su expansión en diversas regiones productoras de cacao (Neira et al., 2020).

Desde el punto de vista morfológico, el cacao Trinitario presenta mazorcas de forma alargada, generalmente con entre ocho y diez surcos bien definidos en su superficie. Durante su desarrollo, los frutos pueden mostrar tonalidades rojas intensas o rojizas oscuras, características que permiten diferenciarlos de otras variedades. Asimismo, las semillas presentan características intermedias entre las variedades parentales, lo que influye en la diversidad de perfiles sensoriales asociados a este tipo de cacao.

En relación con el manejo poscosecha, las almendras de cacao Trinitario requieren un periodo de fermentación que suele oscilar entre cinco y seis días, dependiendo de las condiciones ambientales y del sistema de fermentación empleado. Durante este proceso se generan compuestos precursores que contribuyen al desarrollo de aromas, sabores y notas sensoriales complejas,

razón por la cual esta variedad es ampliamente apreciada por la industria chocolatera para la elaboración de chocolates de calidad diferenciada (Neira et al., 2020).

Figura 3

Variedad de cacao Trinitario



Nota: (Autores, 2026).

1.4.4.Cacao Nacional

El cacao Nacional es una de las variedades tradicionales más representativas del Ecuador y es reconocido internacionalmente por la calidad superior de su aroma y su perfil sensorial distintivo. Esta variedad forma parte del grupo de cacaos denominados “fino de aroma”, altamente valorados por la industria chocolatera especializada debido a sus notas aromáticas florales y frutales características. Su origen se asocia principalmente con las cuencas amazónicas del Ecuador, desde donde se expandió hacia otras regiones productoras del país (Lagunes et al., 2018).

Desde el punto de vista genético, el cacao Nacional presenta características que lo diferencian de otras variedades comerciales, aunque comparte ciertas similitudes con el cacao Criollo en términos de calidad sensorial. Morfológicamente, las mazorcas suelen presentar formas alargadas con superficie ligeramente rugosa y tonalidades que varían desde verde hasta amarillo intenso durante la maduración. Las semillas o almendras presentan características particulares relacionadas con su tamaño, forma y coloración interna, las cuales influyen en el desarrollo de compuestos responsables del aroma característico del cacao Nacional.

Gracias a su reconocido perfil aromático y calidad organoléptica, esta variedad ha sido históricamente uno de los principales productos de exportación del Ecuador dentro del mercado internacional de cacao fino. No obstante, a pesar de su alto valor comercial, el cacao Nacional presenta desafíos productivos relacionados con su susceptibilidad a enfermedades y variabilidad genética, lo que ha motivado investigaciones orientadas a su conservación, mejoramiento y manejo sostenible dentro de los sistemas de producción cacaotera (Lagunes et al., 2018).

Figura 4

Variedad de cacao Nacional



Nota: (Autores, 2026).

1.5. Mazorca de cacao (Fruto).

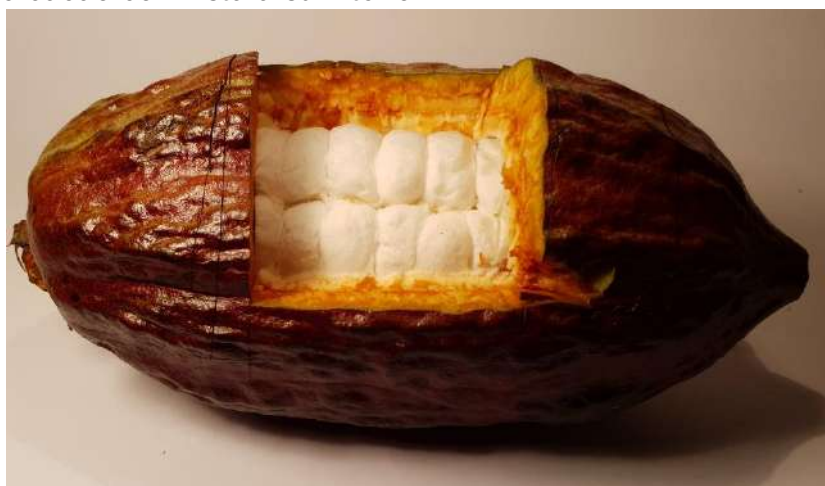
El fruto del *Theobroma cacao* L., comúnmente denominado mazorca, se desarrolla a partir de la flor fecundada y permanece unido al árbol mediante un pedúnculo, estructura que se forma desde las primeras etapas de la floración. Este fruto constituye la unidad productiva del cultivo, ya que en su interior se encuentran las semillas o almendras de cacao, las cuales son utilizadas como materia prima para la elaboración de chocolate y otros productos derivados.

La forma y características morfológicas de la mazorca pueden variar considerablemente dependiendo de la variedad o material genético del cacao. Generalmente, el fruto presenta una forma ovoide, elipsoidal o ligeramente redondeada, con una superficie que puede mostrar entre cinco y diez surcos longitudinales más o menos pronunciados. Estas características externas permiten diferenciar ciertas variedades de cacao dentro de los sistemas de producción.

Durante el proceso de maduración, las mazorcas experimentan cambios en su coloración externa, la cual puede variar desde tonalidades verdes en estados iniciales hasta colores amarillos, anaranjados, rojizos o rojo cenizo cuando alcanzan su madurez fisiológica. Estas variaciones cromáticas dependen tanto de la variedad de cacao como de las condiciones ambientales en las que se desarrolla el cultivo (Vera et al., 2014).

Figura 5

Mazorca de cacao con vista a su interior



Nota: (Autores, 2026).

1.5.1. Almendras de cacao

Las almendras o semillas de cacao se obtienen una vez que las mazorcas alcanzan su madurez fisiológica y son abiertas mediante un corte del fruto para permitir la extracción de su contenido interno. Estas semillas se encuentran agrupadas dentro de la mazorca y están recubiertas por una pulpa mucilaginosa de color blanco, conocida como mucílago, la cual posee un sabor dulce debido a su alto contenido de azúcares y compuestos solubles. Esta sustancia desempeña un papel fundamental durante el proceso de fermentación, ya que sirve como sustrato para el desarrollo de microorganismos responsables de las transformaciones bioquímicas que influyen en la calidad del cacao.

El número de almendras presentes en cada mazorca puede variar dependiendo del tamaño del fruto y de la variedad genética del cacao, encontrándose generalmente entre 20 y 60 semillas por fruto. Estas semillas se disponen alrededor de una estructura central conocida como placenta o vena, la cual las mantiene unidas dentro de la cavidad interna de la mazorca. Las características

físicas, tamaño y coloración de las almendras pueden diferir entre variedades de cacao, lo que influye posteriormente en las propiedades tecnológicas y sensoriales del grano destinado a la industria chocolatera (Germon, 2013).

1.6. Etapa de postcosecha en el cacao

La poscosecha del cacao (*Theobroma cacao* L.) constituye una fase fundamental dentro de la cadena productiva, ya que durante este proceso se desarrollan una serie de operaciones que influyen directamente en la calidad física, química y sensorial de las almendras. Generalmente, el cultivo de cacao inicia su etapa productiva entre los tres y cinco años después de la siembra, dependiendo de la variedad cultivada y de las condiciones agroecológicas. Una vez que las mazorcas alcanzan su madurez fisiológica, se procede a la cosecha, etapa que marca el inicio de las actividades de manejo poscosecha.

Posteriormente, se realiza la selección y separación de las mazorcas maduras, procurando evitar la mezcla de frutos provenientes de diferentes variedades de cacao, ya que cada una puede presentar características específicas y requerimientos distintos durante el proceso fermentativo. Una vez seleccionadas, las mazorcas son abiertas mediante un corte diagonal, con el fin de exponer las almendras ubicadas en su interior. La extracción de las semillas se realiza cuidadosamente de forma manual para evitar daños en los cotiledones, ya que una manipulación inadecuada puede afectar la calidad del grano en las etapas posteriores del procesamiento (Halevy, 2018).

Las almendras frescas, recubiertas por mucílago, son posteriormente sometidas al proceso de fermentación, considerado uno de los pasos más importantes dentro del manejo poscosecha. Durante esta etapa se generan diversas transformaciones microbiológicas y bioquímicas que permiten la formación de compuestos precursores responsables del aroma y sabor característicos del chocolate. Por esta razón, es fundamental controlar adecuadamente las condiciones técnicas del proceso fermentativo, con el fin de garantizar una fermentación adecuada que favorezca el desarrollo de la calidad del grano.

En relación con lo anterior, la Figura 6 presenta de forma esquemática las principales etapas del proceso productivo del cacao y su relación con el manejo poscosecha. Inicialmente se muestra la siembra del cultivo, donde el árbol de cacao se establece en el sistema agrícola. Durante su crecimiento, la planta puede absorber cadmio (Cd) presente en el suelo, el cual es incorporado a través del sistema radicular y posteriormente puede translocarse hacia los diferentes órganos de la planta, incluyendo los frutos y las almendras.

La figura también ilustra la cosecha de las mazorcas y la extracción de las almendras, etapa en la cual se inicia el manejo poscosecha. Durante esta fase se plantea la aplicación de bioinsumos o bioles elaborados con microorganismos eficientes (EM) y extractos frutales de banano y manzana, los cuales son incorporados en la masa fresca de cacao durante el proceso de fermentación. Esta estrategia busca estimular la actividad microbiológica dentro de la masa fermentativa y contribuir potencialmente a la reducción o mitigación de metales pesados presentes en las almendras.

Posteriormente, las almendras fermentadas son sometidas al proceso de secado al sol, etapa que permite reducir el contenido de humedad del grano, estabilizar su composición química y preparar el cacao para su almacenamiento, comercialización y procesamiento industrial. Finalmente, a partir de las almendras secas, se elaboran diversos productos y subproductos derivados del cacao, como chocolate, cacao en polvo y otros productos utilizados en la industria agroalimentaria. De esta manera, la figura complementa el proceso descrito anteriormente, evidenciando que las etapas de fermentación y secado dentro del manejo poscosecha representan puntos críticos donde pueden implementarse estrategias biotecnológicas orientadas a mejorar la calidad del cacao y reducir la presencia de contaminantes, contribuyendo así al fortalecimiento de la cadena productiva y a la obtención de productos más seguros para el consumo humano.

Figura 6
Esquema gráfico de la etapa de postcosecha



Nota: (Autores, 2026).

1.6.1. Alternativas de fermentación.

La fermentación del cacao puede realizarse mediante diversos métodos tradicionales y tecnificados, los cuales influyen directamente en la calidad del grano, ya que durante este proceso se desarrollan reacciones microbiológicas y bioquímicas que permiten la formación de compuestos precursores del aroma y sabor característicos del chocolate. La elección del sistema de fermentación depende principalmente del volumen de producción, los recursos disponibles y las prácticas locales utilizadas por los productores, como se puede apreciar en la figura 7.

Uno de los métodos más antiguos es la fermentación en montón, considerada una técnica ancestral utilizada tradicionalmente por pequeños productores. Este sistema consiste en colocar la masa fresca de cacao directamente sobre el suelo, generalmente sobre hojas de plátano o superficies que permitan el drenaje del mucílago. En este método, las grietas o irregularidades del suelo facilitan la eliminación del líquido generado durante la fermentación. El proceso requiere realizar remociones o volteos periódicos, generalmente después de las primeras 48 horas, con el fin de favorecer la aireación de la masa fermentativa y asegurar una fermentación más uniforme.

En la actualidad, uno de los métodos más utilizados es la fermentación en cajas de madera, donde las almendras frescas se colocan en recipientes de madera diseñados para permitir una fermentación controlada. Estas cajas suelen apilarse o disponerse en serie, lo que facilita la transferencia de la masa fermentativa entre compartimentos durante los volteos. Este sistema permite lograr una fermentación más homogénea y controlada, aunque el tiempo de fermentación puede prolongarse dependiendo del volumen de cacao y la profundidad de las cajas utilizadas (Andrade et al., 2019).

Otro método utilizado por algunos productores es la fermentación en sacos o sacas de yute, donde la masa fresca se deposita en recipientes flexibles que permiten un drenaje relativamente rápido del mucílago. En este sistema, las condiciones tienden a ser más anaeróbicas, lo que puede acelerar el proceso fermentativo. Sin embargo, este método requiere un manejo adecuado para evitar fermentaciones irregulares o incompletas (Andrade et al., 2019).

Finalmente, en sistemas más tecnificados o en instalaciones industriales, se emplea la fermentación en tambores rotatorios, los cuales permiten fermentar grandes volúmenes de cacao de manera más controlada. Estos equipos cuentan con mecanismos que facilitan la mezcla o remoción constante de la masa fermentativa, lo que favorece una distribución uniforme del calor y de los microorganismos responsables de la fermentación. Este tipo de sistema es comúnmente utilizado en centros de acopio, procesadoras o industrias chocolateras, donde se requiere una fermentación más eficiente y estandarizada del cacao (Andrade et al., 2019).

Figura 7

Alternativas de fermentación de cacao utilizadas en sistemas tradicionales y tecnificados



Nota: (Autores, 2026).

1.6.2. Etapa fermentativa de cacao.

La fermentación del cacao es una de las fases más determinantes dentro del manejo poscosecha, ya que durante este proceso se desarrollan las transformaciones bioquímicas y microbiológicas que influyen directamente en la calidad sensorial de las almendras, como se visualiza en la figura 8. A través de la fermentación se generan los compuestos precursores responsables del aroma, sabor y color característicos del chocolate. La duración de este proceso puede variar según la variedad de cacao, las condiciones ambientales y el sistema de fermentación utilizado. En el caso del cacao Nacional, el periodo fermentativo suele oscilar entre cuatro y cinco días, tiempo durante el cual el embrión de la semilla pierde su viabilidad y se alcanzan temperaturas internas que generalmente se sitúan entre 40 y 50 °C. Superar este rango térmico puede provocar sobrefermentación, afectando negativamente la calidad del grano (Alvarado et al., 2022).

Durante la fermentación se desarrollan diversos procesos metabólicos impulsados por la actividad de microorganismos naturales, principalmente levaduras, bacterias lácticas y bacterias acéticas. En las primeras etapas ocurre la hidrólisis de azúcares presentes en el mucílago, iniciándose la llamada fase alcohólica, en la cual las levaduras metabolizan los azúcares y producen alcohol y dióxido de carbono. A medida que avanza el proceso, el mucílago se degrada progresivamente y es expulsado de la masa fermentativa. La actividad microbiana reduce las condiciones de oxígeno en el sistema, favoreciendo inicialmente procesos anaeróbicos, que posteriormente permiten el desarrollo de bacterias responsables de otras transformaciones químicas dentro de la fermentación (Alvarado et al., 2022).

El tiempo total de fermentación depende en gran medida de la variedad de cacao y de las condiciones de manejo. En términos generales, este proceso puede durar entre cuatro y siete días, lo que equivale aproximadamente a 96–144 horas en sistemas tradicionales de fermentación. Es importante considerar que cada variedad de cacao requiere tiempos de fermentación específicos, por lo que no se recomienda mezclar almendras frescas con granos que ya se encuentran en proceso de fermentación, ya que esto puede alterar la uniformidad del proceso y provocar fermentaciones incompletas o excesivas (Vásquez et al., 2022).

Para asegurar una fermentación adecuada es necesario controlar ciertos parámetros fisicoquímicos, entre los cuales destacan la temperatura, el pH y los grados Brix. Estos factores influyen directamente en la actividad microbiana y en las reacciones químicas que determinan el desarrollo de los compuestos responsables del sabor y aroma del cacao. Al finalizar la fermentación, es posible realizar pruebas sensoriales o evaluaciones de aroma, las cuales permiten determinar el grado de fermentación y la calidad final de las almendras destinadas a la industria chocolatera (Alvarado et al., 2022).

Figura 8

*Cambios morfológicos de las almendras de cacao durante el proceso de fermentación y secado (*Theobroma cacao* L.)*



Nota: (Autores, 2026).

1.6.3.Remociones

Durante el proceso de fermentación del cacao, las remociones o volteos de la masa fermentativa representan una práctica fundamental para asegurar que el proceso se desarrolle de manera uniforme y controlada. Esta actividad permite redistribuir las almendras dentro de la masa fermentativa, favoreciendo que todas las semillas estén expuestas a condiciones similares de temperatura, oxigenación y actividad microbiana. Generalmente, la primera remoción se realiza aproximadamente 24 horas después de iniciado el proceso de fermentación, con el objetivo de mejorar la homogeneidad térmica dentro de la masa (Vásquez et al., 2022).

Las remociones también facilitan la entrada controlada de oxígeno, lo que favorece el desarrollo de microorganismos aeróbicos, especialmente bacterias acéticas, las cuales desempeñan un papel clave en la oxidación del alcohol producido por las levaduras durante las primeras fases de la fermentación. Este proceso contribuye a la generación de calor y al desarrollo de reacciones bioquímicas que influyen en la formación de compuestos precursores del aroma y sabor del cacao.

Además, el volteo periódico de las almendras permite regular la temperatura interna de la masa fermentativa, evitando acumulaciones excesivas de calor que podrían ocasionar sobrefermentación o deterioro de la calidad del grano. La frecuencia de estas remociones puede variar dependiendo del método de fermentación empleado, el volumen de cacao fermentado y la variedad cultivada, aunque comúnmente se realizan cada 24 a 48 horas hasta completar el periodo fermentativo. Un manejo adecuado de esta práctica contribuye significativamente a obtener una fermentación más uniforme y un grano de cacao con mejores características sensoriales, garantizando así una mayor calidad del producto final (Vásquez et al., 2022).

1.6.4. Fase alcohólica

Durante el proceso de fermentación del cacao, una de las primeras etapas que se desarrolla es la fase alcohólica, la cual generalmente ocurre durante las primeras 24 a 48 horas del proceso fermentativo. En esta etapa predominan las levaduras, microorganismos que utilizan los azúcares presentes en el mucílago que recubre las almendras de cacao como sustrato energético. Como resultado de su actividad metabólica, estos azúcares son transformados principalmente en etanol (alcohol) y dióxido de carbono, iniciando así una serie de cambios bioquímicos fundamentales dentro de la masa fermentativa.

Este proceso ocurre inicialmente bajo condiciones predominantemente anaeróbicas, debido a la escasa disponibilidad de oxígeno en la masa fresca de cacao. Durante esta fase se observa una disminución progresiva de los grados Brix, producto del consumo de azúcares por parte de las levaduras. Paralelamente, la actividad microbiana genera un incremento gradual de la temperatura dentro de la masa fermentativa, lo que favorece el desarrollo de otros grupos microbianos que participarán en las etapas posteriores de la fermentación.

A medida que avanza esta fase, el mucílago que rodea las almendras comienza a degradarse, facilitando el drenaje de los líquidos presentes en la masa fermentativa. Este fenómeno contribuye a una reducción del contenido de humedad de las almendras, que inicialmente puede alcanzar valores cercanos al 80 %, disminuyendo progresivamente a medida que se eliminan los líquidos

generados durante el proceso fermentativo. Estos cambios preparan las condiciones necesarias para el desarrollo de las siguientes fases de la fermentación, en las cuales intervienen principalmente bacterias lácticas y bacterias acéticas, responsables de continuar las transformaciones químicas que influyen en la calidad final del cacao (Medina, 2020).

1.6.5.Fase acética

La fase acética ocurre después de la fase alcohólica dentro del proceso de fermentación del cacao, y se caracteriza por el predominio de bacterias acéticas, las cuales utilizan el etanol producido previamente por las levaduras como sustrato metabólico. En esta etapa, el alcohol es oxidado en presencia de oxígeno, generando ácido acético, calor y otros compuestos que influyen en las transformaciones bioquímicas del grano. Por esta razón, durante esta fase la fermentación se vuelve principalmente aeróbica, favorecida por las remociones periódicas de la masa fermentativa.

La actividad de las bacterias acéticas provoca un incremento significativo de la temperatura, que puede alcanzar valores cercanos a 45–50 °C, lo cual contribuye a la muerte del embrión de la semilla y permite que el ácido acético y otros metabolitos penetren en el interior de las almendras. Este fenómeno desencadena una serie de reacciones químicas y cambios físicos en los cotiledones, tales como la degradación de compuestos fenólicos, la reducción de la astringencia y el desarrollo de precursores de aroma y sabor característicos del cacao.

Durante esta etapa también se producen modificaciones en el pH interno de las almendras, el cual suele situarse alrededor de 4,5 a 5,0, dependiendo de la intensidad del proceso fermentativo. Estos cambios favorecen la transformación de los compuestos presentes en el grano y contribuyen al desarrollo de las características sensoriales del cacao. El olor generado durante esta fase es característico del ácido acético, similar al aroma del vinagre, lo cual es indicativo de que la fermentación se está desarrollando adecuadamente.

Asimismo, el proceso fermentativo ocasiona cambios en la coloración interna de las almendras, las cuales pasan gradualmente de tonalidades violetas o púrpuras a colores marrón oscuro, señal de que se han iniciado procesos de

oxidación y degradación de compuestos fenólicos. En condiciones adecuadas de fermentación, el pH final del grano puede aproximarse a valores cercanos a 5,5, considerados favorables para el desarrollo de un cacao con perfil sensorial equilibrado y adecuado para la elaboración de chocolate de calidad (Acosta, 2017).

1.6.6.Fase oxidativa

Posteriormente a las fases alcohólica y acética, se desarrolla la fase oxidativa, considerada la etapa final del proceso de fermentación del cacao. Durante esta fase ocurren diversas reacciones de oxidación en el interior de las almendras, las cuales contribuyen a la transformación de compuestos fenólicos y a la reducción de la astringencia y el amargor característicos del grano fresco. Estas reacciones químicas favorecen la formación de compuestos precursores que posteriormente participarán en el desarrollo del aroma y sabor del cacao durante el tostado.

En esta etapa también se produce una expulsión progresiva de líquidos y una disminución del contenido de humedad de las almendras, como resultado de la degradación del mucílago y del incremento de la temperatura dentro de la masa fermentativa. La temperatura alcanza generalmente sus valores máximos durante esta fase, lo cual indica que el proceso fermentativo se encuentra próximo a finalizar.

Además, durante la fase oxidativa se observan cambios importantes en la estructura y coloración de los cotiledones, que pasan de tonalidades violáceas a colores marrones, lo que evidencia la oxidación de compuestos fenólicos presentes en las semillas. Estos cambios estructurales y químicos son indicadores de que la fermentación ha culminado adecuadamente, permitiendo que las almendras estén listas para la siguiente etapa del manejo poscosecha, correspondiente al proceso de secado (Acosta, 2017).

1.7. Pérdida de humedad (Secado)

Una vez finalizado el proceso de fermentación, las almendras de cacao deben someterse a la etapa de secado, la cual puede realizarse mediante métodos

naturales o artificiales. Después de una fermentación adecuada, las almendras presentan un contenido de humedad interno que oscila entre 60 % y 70 %, por lo que es necesario reducir este valor hasta aproximadamente 7 %–8 %, nivel considerado adecuado para su almacenamiento y conservación, permitiendo prolongar la vida útil del grano y evitar el desarrollo de microorganismos indeseables durante el almacenamiento (Erazo et al., 2021).

El objetivo principal del secado es reducir la humedad de las almendras fermentadas, estabilizando así su composición y garantizando condiciones adecuadas para su almacenamiento, transporte y comercialización. Tradicionalmente, este proceso se realiza mediante secado natural, exponiendo las almendras al sol en tendales o superficies de secado, práctica que ha sido utilizada por los productores a lo largo del tiempo. Generalmente, el periodo de secado puede durar entre seis y siete días, aunque el tiempo puede variar dependiendo de las condiciones climáticas, la intensidad de la radiación solar y la humedad ambiental, hasta alcanzar el nivel de humedad óptimo del grano (Quezada et al., 2017).

De forma ancestral, muchos productores recomiendan el secado natural al sol, debido a que permite un proceso más gradual y uniforme en comparación con algunos sistemas artificiales. Durante esta etapa, las almendras son colocadas sobre tendales o plataformas de secado, donde deben ser removidas o volteadas varias veces al día, generalmente hasta cuatro veces, dependiendo de la intensidad de la radiación solar. Esta práctica favorece una evaporación homogénea del agua contenida en las almendras, evitando fermentaciones secundarias o deterioro del grano (Pallares et al., 2016).

Durante el secado también se producen diversos cambios físicos y bioquímicos en el interior de las almendras, los cuales contribuyen al desarrollo de las características sensoriales finales del cacao, como su sabor y aroma característicos. Las remociones frecuentes durante el secado facilitan la evaporación gradual del agua, permitiendo la reducción progresiva del contenido de humedad del grano. Además del secado natural, existen sistemas artificiales de secado, en los cuales se utilizan equipos que aplican aire caliente o secado con gas, permitiendo acelerar el proceso. Sin embargo, el uso de temperaturas

elevadas en estos sistemas puede provocar la desnaturalización de ciertos compuestos precursores de aroma y sabor, lo que podría afectar la calidad sensorial final del cacao (Cruz et al., 2022).

1.8. Calidad de las almendras de cacao

Una vez concluido el proceso de secado, las almendras de cacao alcanzan las condiciones adecuadas para su almacenamiento, comercialización y posterior transformación industrial. A partir de estas semillas se elaboran diversos productos derivados como chocolate, manteca de cacao, licor de cacao y cacao en polvo, entre otros. La calidad de las almendras obtenidas en esta etapa resulta fundamental, ya que influye directamente en el rendimiento industrial, la calidad tecnológica del grano y las características sensoriales del producto final.

Para evaluar la calidad interna de las almendras, uno de los métodos más utilizados es la prueba de corte (*cut test*), técnica que permite analizar visualmente el estado interno del grano y determinar su grado de fermentación. Este procedimiento se encuentra establecido en la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 173:2018, donde se definen los criterios técnicos para la evaluación del cacao en grano. Dentro de estos parámetros se consideran indicadores como el índice de semilla, índice de mazorca y la proporción de testa y cotiledón, los cuales permiten estimar el rendimiento y la calidad física del lote de cacao (INEN, 2018).

A través de la prueba de corte es posible clasificar las almendras según su estado fermentativo, identificando granos bien fermentados, medianamente fermentados, violetas o parcialmente fermentados, así como también los denominados pizarras, que corresponden a almendras insuficientemente fermentadas. Del mismo modo, esta evaluación permite detectar la presencia de granos mohosos o afectados por contaminantes, lo cual puede indicar problemas ocurridos durante las etapas de fermentación, secado o almacenamiento. La correcta aplicación de este análisis facilita la determinación de la calidad comercial del cacao, permitiendo tomar decisiones sobre su destino industrial o comercial dentro de la cadena productiva (INEN, 2018).

1.9. Estado fermentativo (Prueba de corte)

El estado fermentativo de las almendras de cacao puede evaluarse mediante la prueba de corte, un método ampliamente utilizado para determinar la calidad interna del grano una vez concluidas las etapas de fermentación y secado. Este procedimiento se encuentra establecido en la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 173:2018, la cual define los criterios técnicos para la clasificación y control de calidad del cacao en grano destinado a su comercialización y procesamiento industrial (INEN, 2018).

La prueba consiste en realizar un corte longitudinal a un número representativo de almendras, permitiendo observar la estructura interna y la coloración de los cotiledones. Estas características visuales permiten identificar el grado de fermentación alcanzado por el grano, ya que los cambios de color reflejan las transformaciones bioquímicas ocurridas durante el proceso fermentativo. Para facilitar esta evaluación se emplean tableros o separadores de clasificación, donde se distribuyen las almendras según su estado fermentativo.

De acuerdo con los criterios establecidos en la normativa, las almendras pueden clasificarse en diferentes categorías, tales como bien fermentadas, medianamente fermentadas, violetas o parcialmente fermentadas, pizarras (insuficientemente fermentadas) y mohosas. Esta clasificación permite identificar posibles defectos físicos, químicos o microbiológicos que pudieron originarse durante las etapas de fermentación, secado o almacenamiento, afectando la calidad final del cacao.

La aplicación adecuada de la prueba de corte es fundamental para determinar la calidad comercial del cacao, ya que permite evaluar la uniformidad del proceso fermentativo y verificar que el grano cumpla con los estándares exigidos por la industria chocolatera y los mercados internacionales (INEN, 2018).

1.10. Clasificación de almendras de cacao

1.10.1. Bien fermentadas

Las almendras bien fermentadas se identifican mediante la prueba de corte, procedimiento establecido en la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 173:2018, que permite evaluar el grado de fermentación alcanzado por los granos de cacao. Durante esta evaluación, las almendras que han completado adecuadamente el proceso fermentativo presentan una coloración característica café claro a marrón, lo que indica que se han desarrollado correctamente las transformaciones bioquímicas en los cotiledones. Además, desde el punto de vista físico, estas almendras suelen presentar grietas o fisuras internas bien definidas, evidenciando que el proceso fermentativo se desarrolló de manera adecuada y que las condiciones de temperatura, pH y grados Brix fueron controladas durante las diferentes fases de la fermentación (Criollo et al., 2010).

El porcentaje de almendras bien fermentadas dentro de un lote constituye un indicador importante de calidad del cacao. Generalmente, se considera que una fermentación ha sido exitosa cuando más del 60 % de los granos evaluados presentan características de buena fermentación, lo cual refleja que las prácticas realizadas durante el proceso, como las remociones de la masa fermentativa, el control del tiempo de fermentación y el manejo adecuado del secado, fueron aplicadas correctamente. Este adecuado manejo permite el desarrollo de compuestos precursores responsables del aroma y sabor del cacao, elementos fundamentales para la obtención de un producto final de alta calidad destinado a la industria chocolatera (Jiménez et al., 2017).

1.10.2. Medianas fermentadas

Las almendras medianamente fermentadas se identifican durante la prueba de corte por presentar una coloración intermedia, generalmente una combinación de tonalidades café pardo y violeta en los cotiledones. Esta característica indica que el proceso fermentativo se ha desarrollado parcialmente, es decir, que las almendras han experimentado ciertas transformaciones bioquímicas propias de la fermentación, pero no han alcanzado el grado completo necesario para ser clasificadas como bien fermentadas.

Este tipo de granos suele presentarse cuando el proceso de fermentación no se desarrolla de manera totalmente uniforme, ya sea por variaciones en la temperatura, el tiempo de fermentación, la frecuencia de remociones o las condiciones del sistema fermentativo. A pesar de ello, las almendras medianamente fermentadas pueden considerarse aceptables dentro de ciertos parámetros de calidad, siempre que su proporción se mantenga dentro de rangos establecidos.

De acuerdo con criterios de evaluación utilizados en el control de calidad del cacao, un lote puede considerarse adecuado cuando presenta al menos un porcentaje mínimo cercano al 45 % de almendras medianamente fermentadas, siempre que estas se encuentren acompañadas por una proporción significativa de granos bien fermentados. Este indicador permite valorar el grado de uniformidad del proceso fermentativo y su impacto en el desarrollo de las características sensoriales del cacao (Vera et al., 2019).

1.10.3. Violetas

Las almendras violetas corresponden a granos que no han completado adecuadamente el proceso de fermentación, lo que generalmente indica que el desarrollo de las reacciones bioquímicas internas fue incompleto. En estos casos, los cotiledones conservan una coloración violeta o púrpura intensa, observable mediante la prueba de corte, lo cual evidencia que las transformaciones oxidativas propias de la fermentación no se desarrollaron completamente.

Este tipo de almendras suele presentarse cuando el proceso fermentativo se detiene prematuramente o cuando las condiciones de fermentación no fueron adecuadas, por ejemplo, por tiempos de fermentación insuficientes, falta de remociones o temperaturas inadecuadas dentro de la masa fermentativa. Como consecuencia, los granos mantienen altos niveles de compuestos fenólicos, lo que se traduce en un sabor más ácido, amargo y astringente, características que afectan negativamente la calidad sensorial del cacao.

La identificación de almendras violetas se realiza generalmente después del proceso de secado, mediante la aplicación de la prueba de corte, la cual permite evaluar el estado interno del grano. El secado de las almendras fermentadas se

realiza comúnmente mediante exposición directa al sol, proceso que puede durar aproximadamente entre seis y ocho días, dependiendo de las condiciones climáticas de la zona productora. Este procedimiento permite reducir el contenido de humedad del grano y estabilizar su composición para su almacenamiento y comercialización (Larez et al., 2014).

1.10.4. Pizarras

Las almendras pizarrosas corresponden a granos que no han experimentado adecuadamente el proceso de fermentación, lo que impide que se desarrollen las transformaciones bioquímicas necesarias en el interior de los cotiledones. Este tipo de almendras puede originarse por fermentaciones incompletas o deficientes, así como por la utilización de mazorcas inmaduras o sazonas, que no han alcanzado su madurez fisiológica al momento de la cosecha.

Desde el punto de vista morfológico, las almendras pizarrosas se caracterizan por presentar una coloración interna gris oscura o gris pizarra, observable mediante la prueba de corte, lo cual indica que los procesos de oxidación y degradación de compuestos fenólicos no se han desarrollado correctamente durante la fermentación.

Este tipo de granos representa un defecto importante en la calidad del cacao, ya que presentan altos niveles de astringencia y amargor, lo que puede generar notas sensoriales desfavorables en el chocolate y otros productos derivados del cacao. Por esta razón, la presencia de almendras pizarrosas en un lote reduce su valor comercial y su aceptación dentro de la industria chocolatera (Jiménez et al., 2017).

1.10.5. Mohosas

Las almendras mohosas corresponden a granos de cacao que presentan presencia visible de hongos o deterioro físico causado por el desarrollo de microorganismos, lo cual constituye un defecto importante en la calidad del cacao. De acuerdo con los criterios establecidos en las normas de control de calidad, este tipo de daño puede originarse cuando las condiciones de fermentación, secado o almacenamiento no se realizan adecuadamente,

favoreciendo el crecimiento de microorganismos sobre la superficie o en el interior de las almendras (Larez et al., 2014).

La presencia de moho en las almendras generalmente está asociada a niveles elevados de humedad, secado insuficiente o almacenamiento en condiciones inadecuadas. Por esta razón, durante el proceso poscosecha es fundamental asegurar que las almendras alcancen un contenido de humedad adecuado para su conservación, el cual suele situarse entre 7 % y 8 %, con el fin de evitar el desarrollo de hongos y otros agentes contaminantes.

Según los criterios de calidad establecidos, un lote de cacao correctamente fermentado y secado no debería presentar almendras con daños físicos o presencia de moho, ya que estos defectos afectan negativamente la calidad del grano y pueden comprometer la inocuidad del producto final. Además, la presencia de almendras mohosas reduce significativamente el valor comercial del cacao, debido a que puede generar sabores indeseables y posibles riesgos asociados a la contaminación microbiológica (Larez et al., 2014).

1.10.6. Daños físicos de la almendra de cacao

La calidad física de las almendras de cacao constituye un criterio fundamental dentro del control de calidad del grano, ya que influye directamente en su valor comercial y en el rendimiento industrial. Por esta razón, durante las etapas de cosecha y poscosecha se deben aplicar prácticas adecuadas de manejo, especialmente durante la apertura de las mazorcas y la manipulación de las almendras, con el fin de evitar daños que puedan afectar la calidad final del cacao.

Los daños físicos en las almendras pueden presentarse en diferentes formas, tales como granos quebrados, deformados, afectados por enfermedades visibles o con presencia de mohos, así como también por la presencia de impurezas o materiales extraños, entre los que se incluyen fragmentos de ramas, tierra, restos de cáscaras de cacao, hojas u otros residuos provenientes del manejo inadecuado del cultivo o del proceso poscosecha.

Además, ciertos indicadores sensoriales como el color, el olor y la textura de las almendras pueden revelar la existencia de defectos asociados a una

fermentación deficiente o a un secado inadecuado. Estas alteraciones visibles en el grano afectan la calidad del cacao y pueden repercutir negativamente en la elaboración de productos derivados, como el chocolate, disminuyendo su aceptación en la industria agroalimentaria (Ortíz & Guilcapi, 2020).

1.11. Calidad química de las almendras de cacao

La calidad química de las almendras de cacao está relacionada con la composición interna del grano y con la distribución de sus componentes estructurales y bioquímicos. Para su estudio es posible realizar análisis histológicos del tejido interno del grano, los cuales permiten observar la organización celular y la presencia de compuestos químicos asociados a la calidad del cacao. En los cotiledones del cacao se identifican células epidérmicas organizadas en una capa monocelular, donde aproximadamente el 90–95 % del tejido presenta células poco pigmentadas, asociadas principalmente al contenido lipídico del grano, conocido comúnmente como manteca de cacao. Estas células también contienen proporciones importantes de proteínas y compuestos fenólicos, los cuales participan en el desarrollo de las propiedades funcionales y sensoriales del cacao (Mundaca, 2016).

Por otra parte, existe una menor proporción de células pigmentadas, que representan aproximadamente entre el 5 % y el 10 % del tejido interno del grano. Estas células contienen compuestos fenólicos como polifenoles, antocianinas, teobromina y pequeñas cantidades de cafeína, los cuales influyen en el color, el sabor y las propiedades antioxidantes del cacao. La presencia de antocianinas es responsable de la coloración violeta o púrpura observada en algunos granos, característica que suele asociarse a almendras con mayor contenido de compuestos fenólicos y taninos.

Desde el punto de vista de su composición química, las almendras de cacao presentan una alta proporción de lípidos, que generalmente oscila entre 50 % y 60 % del peso seco, constituyendo la denominada manteca de cacao, uno de los componentes más importantes en la elaboración de chocolate. Además, los granos contienen proteínas, fibra cruda, cenizas, carbohidratos y azúcares, los cuales participan en las reacciones químicas que se desarrollan durante la

fermentación y el tostado. En algunos estudios se reporta que el contenido de carbohidratos totales puede alcanzar aproximadamente 26,68 %, mientras que los ácidos orgánicos se presentan en proporciones relativamente bajas, cercanas a 0,05 %, dependiendo de la variedad y del manejo poscosecha del cacao (Mundaca, 2016).

De acuerdo con el Codex Alimentarius (2016), los granos de cacao constituyen la materia prima para la elaboración de diversos productos y subproductos derivados, entre los cuales se incluyen manteca de cacao, licor de cacao, chocolate, polvo de cacao, torta de cacao y otros productos de confitería. El contenido de grasa presente en las almendras varía dependiendo de la variedad genética del cacao. Por ejemplo, el cacao Nacional puede presentar contenidos de grasa cercanos al 60 %, mientras que otros genotipos comerciales suelen presentar valores ligeramente menores, alrededor de 56 %. Los cacaos clasificados como fino de aroma suelen destacar por su mayor proporción de grasa y por sus características sensoriales superiores, lo que influye directamente en el sabor, aroma y textura del chocolate elaborado a partir de estas almendras.

En la industria chocolatera, el contenido de manteca de cacao desempeña un papel fundamental en la calidad del producto final, ya que determina propiedades importantes como la fluidez, la textura y la sensación en boca del chocolate. En algunos casos, los fabricantes pueden refinar la masa de cacao o ajustar la formulación mediante la incorporación de otras grasas compatibles con el objetivo de mejorar ciertas características sensoriales. Históricamente, la manteca de cacao también ha sido utilizada con fines medicinales y cosméticos, debido a sus propiedades emolientes. En la actualidad, el consumo de chocolate con alto contenido de cacao, especialmente aquellos cercanos al 100 %, ha sido asociado con diversos beneficios potenciales para la salud, principalmente por su contenido de compuestos bioactivos y antioxidantes (Quevedo et al., 2018)

1.12. Almacenamiento de almendras de cacao

El almacenamiento de las almendras de cacao constituye una etapa esencial dentro del manejo poscosecha, ya que permite conservar las propiedades

físicas, químicas y sensoriales del grano hasta su posterior comercialización o transformación industrial. Para garantizar una adecuada conservación, las almendras deben mantenerse en ambientes secos, limpios y bien ventilados, evitando condiciones de humedad que favorezcan el crecimiento de hongos o el deterioro del producto. Asimismo, es importante que la humedad relativa y la temperatura del ambiente se mantengan dentro de rangos adecuados que permitan preservar la estabilidad del grano durante el periodo de almacenamiento.

Durante el almacenamiento, los sacos que contienen las almendras deben colocarse sobre tarimas o plataformas de madera, evitando el contacto directo con el suelo, lo cual ayuda a prevenir la absorción de humedad y facilita la circulación de aire. Además, se recomienda que las pilas de sacos no superen aproximadamente cuatro unidades de altura, con el fin de evitar la compactación excesiva y garantizar una adecuada ventilación entre los granos almacenados. De igual manera, es necesario implementar medidas de control contra insectos y otros agentes contaminantes, procurando utilizar métodos que no alteren la calidad del cacao ni generen olores que puedan ser absorbidos por las almendras, ya que estas presentan una alta capacidad para adsorber aromas extraños (Saza & Jiménez, 2020).

En cuanto al material de almacenamiento, el uso de sacos de yute es ampliamente recomendado, debido a que este tipo de material permite una adecuada ventilación del grano y no altera sus características sensoriales. A diferencia de otros materiales sintéticos, los sacos de yute facilitan el intercambio de aire y contribuyen a mantener la estabilidad del cacao durante su almacenamiento.

La coloración de las almendras secas puede variar entre tonalidades grisáceas y marrón oscuro, dependiendo del grado de fermentación alcanzado y del manejo adecuado durante el proceso de secado. Cuando el cacao ha sido correctamente fermentado y secado, las almendras presentan características físicas y sensoriales que favorecen su conservación y comercialización. En contraste, los granos que presentan deficiencias en la fermentación o aromas

excesivamente ácidos tienden a deteriorarse con mayor rapidez durante el almacenamiento.

En algunos casos, las almendras que no cumplen con los estándares de calidad requeridos para la elaboración de chocolate pueden destinarse a la producción de otros subproductos derivados del cacao, como manteca de cacao o pasta de cacao, permitiendo así aprovechar el material disponible dentro de la cadena de valor del cacao (Álvarez et al., 2010).

1.13. Transporte de las almendras de cacao

El transporte de las almendras de cacao constituye una fase relevante dentro de la cadena poscosecha, ya que un manejo inadecuado durante esta etapa puede comprometer la calidad física y sensorial del grano. Durante el traslado es necesario considerar diversos factores que garanticen la integridad del producto, evitando su exposición a contaminantes externos, humedad o fuentes de olores indeseables. Una práctica incorrecta consiste en transportar los sacos de cacao expuestos directamente en plataformas abiertas o en la parte posterior de vehículos sin protección, ya que el humo emitido por los motores y otros contaminantes ambientales pueden ser absorbidos fácilmente por las almendras, alterando su aroma y afectando su calidad (Cardona et al., 2016).

Por esta razón, la práctica más recomendada es realizar el transporte en vehículos cerrados o adecuadamente cubiertos, que garanticen condiciones higiénicas y protejan el cacao de la contaminación externa. Además, es importante aplicar buenas prácticas de transporte, asegurando que los vehículos utilizados estén limpios, secos y libres de sustancias que puedan transferir olores o residuos a los granos.

En la actualidad, diversos sistemas de control y normativas relacionadas con la logística y transporte de productos agrícolas han sido implementados con el propósito de mejorar la calidad del cacao durante su traslado. Muchas empresas del sector cacaotero han adoptado protocolos de transporte y manejo adecuados, lo que contribuye a mantener las condiciones óptimas de las almendras hasta su llegada a los centros de acopio, procesamiento o

exportación. Estas prácticas permiten preservar las características del cacao y asegurar que el producto mantenga los estándares de calidad requeridos dentro de la cadena de suministro (Sánchez, 2017).

1.14. Enzimas (Polifenol oxidasa)

La polifenol oxidasa (PPO) es una enzima ampliamente distribuida en tejidos vegetales y en diversos alimentos de origen vegetal. Esta enzima participa en reacciones de oxidación de compuestos fenólicos, lo que provoca procesos de pardeamiento enzimático que modifican la coloración natural de los tejidos, generando tonalidades que pueden variar desde amarillentas hasta marrón oscuro. En términos bioquímicos, estas reacciones están asociadas a la oxidación de compuestos fenólicos, especialmente flavonoides y otros polifenoles, que al entrar en contacto con el oxígeno forman compuestos oscuros conocidos como quinonas, responsables del cambio de color en los tejidos vegetales (Tamay de Dios et al., 2013).

Durante el proceso de fermentación del cacao, la actividad de la polifenol oxidasa desempeña un papel importante en las transformaciones químicas que ocurren dentro del grano. Esta enzima facilita la oxidación de compuestos fenólicos presentes en los cotiledones, contribuyendo al desarrollo del color marrón característico de las almendras correctamente fermentadas. Además, estas reacciones participan en la reducción de compuestos fenólicos responsables de la astringencia y el amargor, favoreciendo el desarrollo de compuestos precursores del aroma y sabor del cacao.

La actividad de la polifenol oxidasa no desaparece completamente durante el proceso fermentativo; por el contrario, puede mantenerse activa durante las etapas posteriores, incluyendo el proceso de secado, donde continúa participando en la formación del color marrón típico de las almendras bien fermentadas. Este fenómeno está estrechamente relacionado con las transformaciones químicas que ocurren en los compuestos fenólicos del grano, lo que influye directamente en la calidad sensorial del cacao.

En consecuencia, la acción de la polifenol oxidasa tiene una relevancia significativa en la fermentación del cacao, ya que contribuye a la formación de compuestos oxidativos y precursores aromáticos, los cuales influyen en el perfil sensorial final del cacao y en las características distintivas del chocolate elaborado a partir de diferentes variedades de *Theobroma cacao* L. (Barrera & Rodríguez, 2014).

1.14.1. Polifenol presente en el banano

El banano (*Musa acuminata*) es una fruta ampliamente cultivada en regiones tropicales y se caracteriza por su contenido significativo de compuestos fenólicos, los cuales poseen propiedades antioxidantes y participan en diversas reacciones bioquímicas en sistemas biológicos y alimentarios. Estos compuestos fenólicos se encuentran distribuidos en diferentes partes del fruto, aunque su concentración puede variar dependiendo del estado de maduración. Diversos estudios han demostrado que, a medida que el banano alcanza su madurez fisiológica y adquiere una coloración amarilla intensa, se incrementa la concentración de ciertos polifenoles y compuestos bioactivos presentes en el fruto (Martínez & Cayón, 2012).

Durante el proceso de fermentación del cacao, la incorporación de extractos de frutas como el banano puede influir en la dinámica bioquímica de la masa fermentativa. Los compuestos fenólicos presentes en el banano pueden contribuir a procesos de oxidación y pardeamiento enzimático, fenómenos que participan en las transformaciones químicas asociadas al desarrollo del color y a la modificación de compuestos fenólicos del cacao. Aunque el pardeamiento enzimático suele considerarse indeseable en algunos alimentos, en el caso de la fermentación del cacao estas reacciones forman parte de los procesos que favorecen el desarrollo de características sensoriales propias del grano fermentado, especialmente cuando se alcanzan los tiempos adecuados de fermentación.

Adicionalmente, durante las etapas posteriores del procesamiento del cacao, particularmente en el tostado, se desarrollan reacciones químicas complejas como la reacción de Maillard, las cuales contribuyen a la formación de compuestos aromáticos responsables del perfil sensorial del chocolate. En este

contexto, los compuestos presentes en el banano pueden participar indirectamente en el desarrollo de estas transformaciones bioquímicas dentro del sistema fermentativo del cacao (Barrientos et al., 2018).

Por otra parte, investigaciones han reportado que la concentración de polifenoles en el banano aumenta conforme el fruto alcanza su estado de madurez, lo cual sugiere que el uso de bananos en estados avanzados de maduración podría aportar mayores cantidades de estos compuestos durante procesos biotecnológicos o fermentativos (García et al., 2016). Estas características convierten al banano en una materia prima potencialmente útil en estudios relacionados con procesos fermentativos y aplicaciones biotecnológicas en alimentos.

Tabla 1
Principales componentes nutricionales del plátano

Componente	Cantidad por 100 g de PC	
	Media $\pm$ DE (n=36)	Unidades
Energía	93 $\pm$ 2,16	g
Hidratos de carbono	21,7 $\pm$ 0,49	g
Almidón	2,55 $\pm$ 0,74	g
Azúcares	17,83 $\pm$ 0,62	g
Fructosa	6,60 $\pm$ 1,20	g
Glucosa	6,67 $\pm$ 1,18	g
Sacarosa	2,6 $\pm$ 1,80	g
Maltosa	<0,5	
Lactosa	<0,5	
Fibra dietética total	2,22 $\pm$ 0,34	g
Soluble	0,44 $\pm$ 0,22	g
Insoluble	1,78 $\pm$ 0,14	g
Proteínas	1,40 $\pm$ 0,16	g
Grasas	<0,5	g
Humedad	76,07 $\pm$ 0,46	g
Cenizas	0,80 $\pm$ 0,00	g
Minerales	22,67 $\pm$ 1,90	mg
Fósforo	0,06 $\pm$ 0,01	mg
Manganeso	<1,5	mg
Cobre	0,28 $\pm$ 0,03	mg
Hierro	0,2 $\pm$ 0,01	mg
Zinc	5,00 $\pm$ 0,24	mg
Calcio	36,73 $\pm$ 0,66	mg
Magnesio	419,9 $\pm$ 11,28	mg
Potasio	<10	mg
Yodo	<0,002	mg
Sodio	<0,005	mg
Sal (NaCl)		
Vitaminas		
A	<0,02	mg
C	12,35 $\pm$ 0,25	mg
E	0,11 $\pm$ 0,03	mg
B1 (tiamina)	0,03 $\pm$ 0,00	mg
B2 (riboflavina)	<0,05	mg

B3 (niacina)	0,62±0,01	mg
B6	0,52±0,01	mg
B9 (Ácido fólico)	21,00±1,41	mg
Polifenoles totales	269 ±14,85	mg Kg ⁻¹

Nota: (Santurino et al., 2022).

1.14.2. Polifenol de manzana

La manzana (*Malus domestica*) es una fruta que presenta una composición nutricional diversa, caracterizada por la presencia de azúcares, fibra, vitaminas, minerales y una amplia variedad de compuestos fenólicos con actividad antioxidante. Entre los compuestos bioactivos presentes en la manzana destacan los flavonoides, ácidos fenólicos y otros metabolitos secundarios, los cuales participan en diferentes procesos bioquímicos asociados a la estabilidad y transformación de los tejidos vegetales. Además, esta fruta contiene la enzima polifenol oxidasa (PPO), responsable del fenómeno conocido como pardeamiento enzimático, que ocurre cuando los compuestos fenólicos reaccionan con el oxígeno en presencia de esta enzima, generando pigmentos oscuros en los tejidos vegetales (Pshenichnyuk et al., 2016).

En sistemas fermentativos como el del cacao, la presencia de compuestos fenólicos y enzimas oxidativas provenientes de frutas puede influir en las transformaciones bioquímicas que ocurren dentro de la masa fermentativa. La incorporación de extractos o componentes provenientes de la manzana puede favorecer reacciones de oxidación de compuestos fenólicos, lo que contribuye al desarrollo de cambios de color en las almendras y a la modificación de ciertos compuestos responsables del sabor y la astringencia. En este contexto, la adición de enzimas o compuestos fenólicos durante la fermentación puede influir en la velocidad de desarrollo de la tonalidad marrón característica de las almendras fermentadas.

Por otra parte, estudios han abordado el control del pardeamiento enzimático en tejidos de manzana, debido a que este fenómeno puede afectar la calidad visual de productos frescos o procesados. En este sentido, se han desarrollado diversas tecnologías orientadas a regular o controlar la liberación y actividad de la enzima polifenol oxidasa, con el objetivo de minimizar el oscurecimiento no deseado en productos derivados de esta fruta (Piedra, 2017).

Las enzimas oxidativas como la polifenol oxidasa se encuentran presentes en diferentes frutas y vegetales, siendo responsables de reacciones que involucran la oxidación de compuestos fenólicos. Estas reacciones también se relacionan con procesos químicos complejos que ocurren durante el procesamiento de alimentos, como el pardeamiento enzimático y, en etapas posteriores de transformación térmica, con reacciones como la reacción de Maillard, las cuales contribuyen a la formación de compuestos responsables del color, aroma y sabor en productos alimentarios.

Tabla 2
Composición nutricional de la manzana

Componente	Cantidad por 100 g de PC
Energía (Kcal)	53
Proteína (g)	0,3
Lípidos totales (g)	Tr
AG saturados (g)	...
AG monoinsaturados (g)	...
AG poliinsaturados (g)	...
Hidratos de carbono (g)	12
Fibra (g)	2
Agua (g)	85,7
Calcio (mg)	6
Hierro (mg)	0,4
Yodo (µg)	2
Magnesio (mg)	5
Zinc (mg)	0,1
Sodio (mg)	2
Potasio (mg)	120
Fósforo (mg)	8
Tiamina (mg)	0,04
Riboflavina (mg)	0,02
Vitamina B6 (mg)	0,03
Folatos (µg)	5

Nota: (Moreiras et al., 2013).

1.15. El cadmio

El cadmio (Cd) es un elemento químico perteneciente al grupo de los metales pesados, identificado en la tabla periódica con el número atómico 48. En su forma iónica más común en sistemas ambientales, el Cd^{2+} , este metal presenta una elevada estabilidad química y una notable capacidad de movilidad en suelos y sistemas biológicos, lo que favorece su incorporación en diferentes matrices ambientales y agrícolas. Debido a su alta densidad y toxicidad, el cadmio es

considerado uno de los contaminantes más relevantes en estudios de seguridad alimentaria y contaminación ambiental (Rofner, 2022).

Desde el punto de vista físico, el cadmio se caracteriza por presentar una coloración blanco plateada con tonalidades azuladas, además de ser un metal relativamente blando y maleable. Este elemento posee un punto de fusión aproximado de 321 °C y un punto de ebullición cercano a 767 °C, lo que indica que se requieren altas temperaturas para modificar su estado físico o alterar su estructura química. Estas propiedades contribuyen a que el cadmio pueda persistir en el ambiente durante largos periodos.

Una de las características más relevantes del cadmio es su capacidad de bioacumulación, es decir, la capacidad de acumularse progresivamente en organismos vivos a lo largo del tiempo. Este metal puede ingresar al ambiente tanto por procesos naturales como por actividades antropogénicas, incluyendo actividades industriales, minería, uso de fertilizantes fosfatados y emisiones metalúrgicas. Una vez presente en el suelo, el cadmio puede ser absorbido por las plantas a través del sistema radicular, lo que facilita su incorporación en la cadena alimentaria y representa un riesgo potencial para la salud humana y los ecosistemas (Rofner, 2022).

1.15.1. Forma de contaminación por cadmio en el suelo.

En La contaminación por cadmio en los suelos agrícolas constituye uno de los principales desafíos ambientales y productivos para los sistemas agrícolas, especialmente en cultivos como *Theobroma cacao* L.. La remediación de suelos contaminados con este metal pesado suele ser un proceso complejo y prolongado, que puede requerir varios años para lograr reducciones significativas en su concentración. En diversas zonas productoras de cacao en Ecuador se han reportado niveles de cadmio superiores a 1 mg kg⁻¹ en el suelo, situación que representa una preocupación para la producción y comercialización del cacao en mercados internacionales (Arellanos et al., 2021).

Entre los factores que contribuyen a la presencia de cadmio en los suelos agrícolas se encuentra el uso intensivo de fertilizantes fosfatados y otros insumos agroquímicos, los cuales pueden contener trazas de metales pesados, incluyendo cadmio. Con el tiempo, la aplicación continua de estos productos

puede favorecer la acumulación progresiva del metal en el suelo, incrementando el riesgo de absorción por parte de las plantas cultivadas.

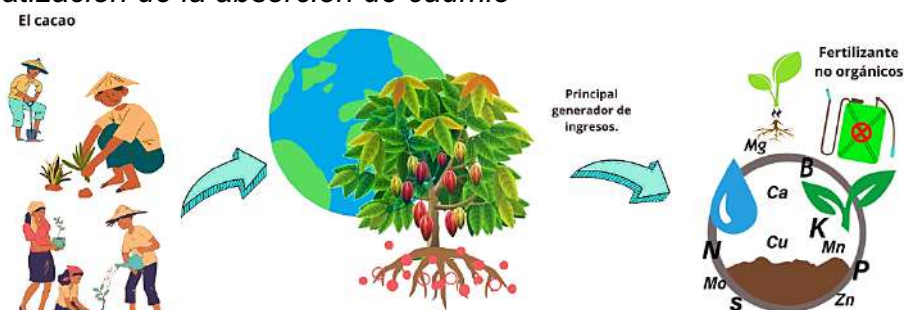
Además de las fuentes asociadas a la actividad agrícola, el cadmio también puede incorporarse al suelo a través de procesos naturales y ambientales. Este metal puede encontrarse asociado a diferentes fracciones del suelo, tales como la materia orgánica, los complejos de intercambio catiónico, los óxidos de hierro y manganeso, o en la fracción residual proveniente de rocas madre y materiales geológicos, incluyendo rocas fosfóricas y materiales volcánicos. Asimismo, las emisiones atmosféricas provenientes de actividades industriales o metalúrgicas pueden contribuir a la deposición de cadmio en los suelos agrícolas (Hernández et al., 2019).

En respuesta a esta problemática, se han propuesto diversas estrategias orientadas a reducir la disponibilidad y movilidad del cadmio en el suelo, incluyendo la aplicación de enmiendas orgánicas, biochar, microorganismos o prácticas de manejo sostenible del suelo, con el objetivo de disminuir la absorción del metal por parte de las plantas. La implementación de estas estrategias es especialmente importante en sistemas productivos destinados a mercados internacionales, donde la presencia de cadmio en los granos de cacao está regulada por normativas como las establecidas por la Unión Europea, que fijan límites máximos permisibles para garantizar la inocuidad de los productos derivados del cacao.

El cultivo de *Theobroma cacao* L. ha sido objeto de numerosas investigaciones enfocadas en comprender los mecanismos de absorción, acumulación y translocación del cadmio dentro de la planta, debido a la importancia económica y social de este cultivo en países productores. La presencia de cadmio en los granos de cacao representa un riesgo potencial para la salud humana cuando se encuentra en concentraciones elevadas, ya que este metal puede acumularse en el organismo tras exposiciones prolongadas. Diversos estudios han asociado la exposición crónica al cadmio con alteraciones renales, problemas óseos y otros efectos adversos en la salud, lo que ha impulsado el desarrollo de investigaciones orientadas a reducir su presencia en los sistemas agrícolas (Moore et al., 2020).

En Ecuador se han identificado plantaciones de cacao donde las concentraciones de cadmio en el suelo y en las almendras superan los límites establecidos por las normativas internacionales, lo que ha generado preocupación en el sector cacaotero. En este contexto, diversos estudios han descrito el proceso de absorción del cadmio desde el suelo hacia la planta de cacao, su posterior acumulación en las almendras y la posible transferencia del metal a productos derivados como el chocolate, lo que resalta la importancia de implementar estrategias de mitigación que garanticen la seguridad alimentaria y la sostenibilidad de la cadena productiva del cacao (Veintimilla et al., 2020).

Figura 9
Esquemización de la absorción de cadmio



Nota: (Autores, 2026).

El cadmio se encuentra en manera natural y fuentes antropogénicas en las almendras de cacao a través del tiempo se vienen investigando la manera que atrae la planta este metal ya que por su estructura es compleja de expulsar al ser ingerido por el cuerpo humano, investigaciones realizadas datan que la mayor cantidad de cadmio está en productos que consumimos a diarios consumo masivo la forma en que se acumulan en el cuerpo es debido a que el cadmio actúa mejor en baja de calcio y bajas de hierro en el organismo (Rofner, 2022).

1.16. Estrategias biológicas para la mitigación del cadmio

En los últimos años, la presencia de cadmio (Cd^{2+}) en cultivos agrícolas, particularmente en sistemas de producción de cacao, ha generado gran preocupación a nivel internacional debido a los riesgos que representa para la salud humana y las restricciones comerciales impuestas por organismos reguladores. En este contexto, las estrategias biológicas para la mitigación del

cadmio han cobrado relevancia como alternativas sostenibles frente a los métodos tradicionales de remediación química o física.

Las estrategias biológicas se fundamentan en el uso de organismos vivos o sus procesos metabólicos para reducir, inmovilizar o transformar metales pesados presentes en el suelo o en los tejidos vegetales. Entre estas estrategias se incluyen la biorremediación microbiana, la fitorremediación, el uso de microorganismos benéficos del suelo, la inoculación con micorrizas y la aplicación de consorcios microbianos, los cuales actúan a través de diversos mecanismos bioquímicos y fisiológicos.

Dentro de estos mecanismos se destacan procesos como la bioadsorción, bioacumulación, complejación, precipitación y transformación química del metal, los cuales permiten reducir la movilidad y biodisponibilidad del cadmio en el sistema suelo-planta. Estas interacciones pueden ocurrir tanto en la rizosfera como dentro de los tejidos vegetales, lo que favorece una disminución de la absorción del metal por parte de las raíces o su translocación hacia órganos comestibles como las almendras de cacao.

En sistemas cacaoteros, estas estrategias biológicas se consideran especialmente prometedoras debido a que permiten mantener la productividad del cultivo sin alterar significativamente las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, lo que las convierte en herramientas compatibles con modelos de agricultura sostenible y agroecológica.

1.17. La biorremediación

La biorremediación es una tecnología ambiental basada en la utilización de organismos vivos, tales como bacterias, hongos, levaduras y plantas, con el propósito de reducir, eliminar o transformar contaminantes presentes en el ambiente. En el caso específico de los metales pesados como el cadmio, esta técnica se centra en aprovechar las capacidades metabólicas y fisiológicas de ciertos microorganismos y organismos simbióticos para disminuir la toxicidad y disponibilidad del metal en el suelo y en los sistemas agrícolas.

A diferencia de otros métodos convencionales de remediación, la biorremediación se caracteriza por ser menos invasiva, más económica y ambientalmente sostenible, ya que no requiere el uso intensivo de productos químicos ni genera residuos secundarios que puedan afectar el ecosistema. Además, esta estrategia permite mantener la actividad biológica del suelo y mejorar la fertilidad edáfica a largo plazo.

Los microorganismos involucrados en procesos de biorremediación poseen diversas capacidades que les permiten interactuar con metales pesados. Entre estas capacidades se incluyen la secreción de compuestos quelantes, la producción de polisacáridos extracelulares, la adsorción del metal en la superficie celular, la precipitación en forma de complejos insolubles y la transformación del metal hacia formas menos tóxicas o menos biodisponibles.

En particular, los hongos micorrízicos arbusculares han demostrado una notable eficiencia en la reducción de la absorción de cadmio por parte de las plantas. Estas asociaciones simbióticas entre hongos y raíces vegetales favorecen la formación de una red micelial en el suelo que actúa como una barrera biológica frente a la entrada de metales pesados, limitando su movilidad hacia los tejidos vegetales. Además, estas micorrizas contribuyen a mejorar la absorción de nutrientes esenciales como fósforo, nitrógeno y micronutrientes, lo que favorece el crecimiento y desarrollo de las plantas.

Investigaciones recientes han evidenciado que algunas especies de hongos micorrízicos, como *Glomus hoi* y *Claroideoglomus etunicatum*, presentan una alta capacidad para reducir la acumulación de cadmio en suelos agrícolas y en plantas de cacao. Estos organismos no solo contribuyen a disminuir la disponibilidad del metal en el suelo, sino que también promueven el desarrollo radicular, el crecimiento vegetal y la tolerancia al estrés ambiental, lo que se traduce en un mejor desempeño agronómico del cultivo (Morejón, 2024).

Asimismo, diversos estudios han demostrado que la interacción entre micorrizas, bacterias del suelo y otros microorganismos benéficos puede generar efectos sinérgicos en la mitigación de metales pesados, incrementando la eficiencia de los procesos de biorremediación. Estas interacciones complejas permiten establecer sistemas biológicos capaces de regular la movilidad del cadmio,

disminuir su absorción por las plantas y contribuir a la restauración de suelos contaminados.

En consecuencia, la biorremediación se ha convertido en una de las estrategias más prometedoras para enfrentar los problemas asociados a la contaminación por metales pesados en sistemas agrícolas tropicales. Su aplicación en cultivos como el cacao representa una alternativa viable para reducir la presencia de cadmio en las almendras, mejorar la calidad del grano y garantizar el cumplimiento de las normativas internacionales de seguridad alimentaria, contribuyendo al mismo tiempo a la sostenibilidad ambiental de los sistemas productivos.

1.18. La fitorremediación

La fitorremediación es una estrategia biotecnológica utilizada para la recuperación de suelos contaminados mediante el empleo de plantas capaces de absorber, acumular, estabilizar o transformar contaminantes, entre ellos los metales pesados como el cadmio (Cd^{2+}). Este enfoque se ha consolidado como una alternativa ecológica y económicamente viable frente a los métodos tradicionales de descontaminación, ya que aprovecha los procesos fisiológicos naturales de las plantas para reducir la concentración de contaminantes presentes en el suelo.

El principio fundamental de la fitorremediación se basa en la capacidad que poseen ciertas especies vegetales para absorber metales pesados a través de sus raíces y posteriormente almacenarlos en diferentes órganos de la planta, tales como hojas, tallos o raíces. Este proceso puede ocurrir mediante distintos mecanismos fisiológicos como la fitoextracción, fitoestabilización, fitodegradación y rizofiltración, dependiendo del tipo de planta y del comportamiento del contaminante dentro del sistema suelo-planta.

Dentro de este contexto, algunas especies vegetales han sido identificadas como plantas hiperacumuladoras, debido a su capacidad para tolerar y acumular elevadas concentraciones de metales pesados sin presentar efectos tóxicos severos en su crecimiento y desarrollo. Entre estas especies se destaca

Amaranthus hybridus, una planta que ha demostrado una notable eficiencia en la absorción y acumulación de cadmio en sus tejidos vegetales. Diversos estudios han evidenciado que, a medida que la planta incrementa su biomasa durante el crecimiento, también aumenta su capacidad para concentrar este metal en sus estructuras celulares, lo que la convierte en una especie prometedora para la remediación de suelos contaminados.

Por otra parte, especies como *Eleusine indica* presentan un comportamiento diferente frente a la presencia de cadmio en el suelo. En este caso, la planta muestra una mayor tolerancia fisiológica al metal, acumulándolo principalmente en el sistema radicular. Este mecanismo permite limitar la movilidad del cadmio hacia otras partes de la planta, reduciendo su translocación hacia los tejidos aéreos y favoreciendo la estabilización del contaminante en el suelo. Este tipo de estrategia es especialmente útil en procesos de fitoestabilización, donde el objetivo principal es disminuir la biodisponibilidad del metal y evitar su dispersión en el ambiente.

Además de su capacidad para remover contaminantes, la fitorremediación ofrece múltiples ventajas ambientales. Entre ellas se destacan su bajo costo de implementación, mínima alteración del ecosistema, mejora de la estructura del suelo y aumento de la actividad microbiológica en la rizosfera. La interacción entre las raíces de las plantas y los microorganismos del suelo genera un ambiente biológico activo que puede favorecer procesos adicionales de inmovilización o transformación de metales pesados.

En sistemas agrícolas tropicales, como los cultivos de cacao, la aplicación de técnicas de fitorremediación puede representar una alternativa estratégica para disminuir la disponibilidad de cadmio en el suelo antes de establecer nuevas plantaciones o como parte de programas de recuperación de suelos contaminados. La implementación de estas especies vegetales en rotaciones de cultivo o en sistemas agroforestales permite reducir progresivamente la concentración de metales pesados, contribuyendo a mejorar la calidad del suelo y la inocuidad de los productos agrícolas.

Diversos estudios han demostrado que el uso de plantas hiperacumuladoras en programas de fitorremediación puede ser una herramienta eficaz para la gestión

de suelos contaminados con cadmio, favoreciendo procesos de descontaminación gradual sin comprometer la sostenibilidad del sistema productivo. En este sentido, la incorporación de especies vegetales con alta capacidad de acumulación y tolerancia a metales pesados representa una estrategia prometedora para la recuperación ambiental y la reducción de riesgos asociados a la contaminación por cadmio en sistemas agrícolas (Carrillo et al., 2025).

1.19. Las enmiendas del suelo

Las enmiendas del suelo corresponden a materiales orgánicos o inorgánicos que se incorporan al suelo con el objetivo de mejorar sus propiedades físicas, químicas y biológicas, favoreciendo así el desarrollo adecuado de los cultivos y la sostenibilidad de los sistemas agrícolas. A diferencia de los fertilizantes, cuya función principal es aportar nutrientes directamente a las plantas, las enmiendas actúan principalmente sobre la condición del suelo, modificando características como la acidez, la estructura, la capacidad de intercambio catiónico y la disponibilidad de elementos minerales.

En suelos agrícolas donde existe presencia de metales pesados, como el cadmio (Cd^{2+}), las enmiendas desempeñan un papel importante en la reducción de la movilidad y biodisponibilidad de estos contaminantes. En particular, los suelos ácidos favorecen la solubilidad del cadmio, lo que incrementa su disponibilidad para ser absorbido por las raíces de las plantas. Por esta razón, la aplicación de enmiendas en suelos con pH bajo puede contribuir a modificar las condiciones químicas del suelo, favoreciendo la inmovilización del metal pesado.

Uno de los principales efectos de las enmiendas es su capacidad para neutralizar los protones (H^+) presentes en suelos ácidos, lo cual genera un incremento en el pH del suelo y, simultáneamente, aumenta la concentración de bases intercambiables como calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}) y potasio (K^+). Este proceso químico favorece la formación de complejos menos solubles entre el cadmio y otros componentes del suelo, reduciendo así su disponibilidad para las

plantas. Como consecuencia, se disminuye la absorción del metal por parte del sistema radicular y se reduce su acumulación en los tejidos vegetales.

Entre las enmiendas más utilizadas para este propósito se encuentran la cal agrícola, dolomita, yeso agrícola, biochar, compost, materia orgánica y algunos minerales arcillosos, los cuales poseen propiedades capaces de mejorar la estabilidad química del suelo. En particular, las enmiendas ricas en calcio y materia orgánica tienen la capacidad de adsorber o inmovilizar metales pesados, limitando su movilidad dentro del perfil del suelo.

Además de su función en la mitigación de contaminantes, las enmiendas contribuyen significativamente a mejorar la estructura del suelo, favoreciendo la formación de agregados estables que incrementan la porosidad, la aireación y la capacidad de retención de agua. Estos cambios estructurales permiten un mejor desarrollo del sistema radicular de las plantas, lo que se traduce en una mayor eficiencia en la absorción de nutrientes esenciales.

Otro aspecto importante es que las enmiendas orgánicas promueven la actividad microbiológica del suelo, estimulando la proliferación de microorganismos benéficos que participan en procesos de descomposición, mineralización de nutrientes y transformación de compuestos tóxicos. Esta interacción entre materia orgánica, microorganismos y minerales del suelo contribuye a mejorar la fertilidad edáfica y a crear un ambiente más favorable para el crecimiento de las plantas.

En cultivos tropicales como el cacao, la aplicación de enmiendas ha demostrado ser una práctica agronómica relevante para regular la acidez del suelo y disminuir la absorción de metales pesados, especialmente en regiones donde los suelos presentan características ácidas o donde existe presencia natural de cadmio derivada de materiales parentales o de prácticas agrícolas intensivas. De esta manera, el manejo adecuado de enmiendas puede contribuir no solo a mejorar la productividad del cultivo, sino también a garantizar la calidad e inocuidad de las almendras de cacao destinadas a la industria alimentaria.

Por lo tanto, la aplicación de enmiendas constituye una herramienta agronómica clave dentro de las estrategias de manejo sostenible del suelo, permitiendo reducir la biodisponibilidad de cadmio, mejorar las propiedades del suelo y

favorecer el desarrollo saludable de los cultivos, contribuyendo así a la seguridad alimentaria y al cumplimiento de las normativas internacionales relacionadas con la presencia de metales pesados en productos agrícolas (Zavala et al., 2022).

1.20. Biochar

El biochar, también conocido como biocarbón, es un material carbonoso sólido que se obtiene a partir de la pirólisis de biomasa orgánica en condiciones de bajo o nulo contenido de oxígeno. Este proceso térmico transforma residuos orgánicos, como restos agrícolas, madera, cáscaras o residuos forestales, en un material altamente estable, caracterizado por su estructura porosa, elevada superficie específica y gran estabilidad química. Debido a estas propiedades, el biochar ha sido ampliamente estudiado en los últimos años como una herramienta eficaz para mejorar la calidad del suelo y mitigar la presencia de contaminantes, incluyendo metales pesados como el cadmio (Cd^{2+}).

Una de las principales características del biochar es su alta capacidad de adsorción, la cual se debe a su estructura microporosa y a la presencia de grupos funcionales superficiales que permiten la retención de diferentes compuestos químicos. Estas propiedades favorecen la inmovilización de metales pesados en el suelo, reduciendo su movilidad y disponibilidad para las plantas. En el caso del cadmio, el biochar puede actuar como un adsorbente que fija el metal en su superficie, disminuyendo significativamente su absorción por el sistema radicular de los cultivos.

Diversas investigaciones han demostrado que la incorporación de biochar en suelos agrícolas puede reducir considerablemente la concentración de cadmio disponible, logrando disminuir su presencia tanto en el suelo como en los tejidos de las plantas. En sistemas de producción de cacao, se ha reportado que la aplicación de biochar puede reducir el contenido de cadmio hasta en un 99 % en el suelo y aproximadamente un 97 % en las almendras de cacao, lo que representa una estrategia prometedora para mitigar la acumulación de este metal pesado en los granos destinados a la industria alimentaria.

El efecto del biochar en la reducción del cadmio está asociado a varios mecanismos fisicoquímicos. Entre ellos se destacan la adsorción superficial del metal, la formación de complejos estables, la precipitación química y el aumento del pH del suelo, factores que contribuyen a disminuir la solubilidad del cadmio. En particular, el biochar suele presentar un pH ligeramente alcalino, lo que permite neutralizar la acidez del suelo y favorecer la formación de compuestos menos solubles de cadmio, reduciendo así su biodisponibilidad.

Asimismo, el biochar posee una alta capacidad de intercambio catiónico (CIC), propiedad que le permite retener cationes metálicos presentes en el suelo, evitando su lixiviación o absorción por parte de las plantas. Este proceso contribuye a mejorar la estabilidad química del suelo y a reducir los riesgos asociados a la contaminación por metales pesados.

La eficacia del biochar como enmienda del suelo puede variar dependiendo de diversos factores, entre los cuales se incluyen el tipo de biomasa utilizada para su producción, las condiciones de pirólisis, las características fisicoquímicas del biochar obtenido y las propiedades del suelo donde se aplica. En general, su efectividad tiende a ser mayor en suelos ácidos, de textura gruesa o arenosa y con contenido medio de carbono orgánico, condiciones en las cuales el biochar puede mejorar significativamente la capacidad de retención de nutrientes y contaminantes.

Además de su capacidad para inmovilizar metales pesados, el biochar también contribuye a mejorar las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. Su incorporación favorece la estructura del suelo, la retención de agua, la actividad microbiana y la disponibilidad de nutrientes esenciales, lo que puede traducirse en un mejor crecimiento y desarrollo de los cultivos.

En sistemas agrícolas tropicales como los cultivos de cacao, el uso de biochar se ha considerado una estrategia sostenible que no solo ayuda a reducir la absorción de cadmio por las plantas, sino que también contribuye a la mejora de la fertilidad del suelo y al secuestro de carbono, lo que representa un beneficio adicional en términos de mitigación del cambio climático.

Por lo tanto, la aplicación de biochar en suelos contaminados con metales pesados se presenta como una alternativa viable dentro de las prácticas de

manejo sostenible del suelo, permitiendo reducir la biodisponibilidad de cadmio, mejorar las condiciones edáficas y garantizar una mayor calidad e inocuidad en la producción de cacao, aspectos fundamentales para cumplir con los estándares internacionales de comercialización (Barrezueta & Sisalima, 2021).

1.21. Proceso de postcosecha del cacao

El proceso de postcosecha del cacao constituye una fase fundamental dentro de la cadena de producción, ya que en esta etapa se desarrollan una serie de transformaciones bioquímicas y físicas que determinan la calidad final de las almendras destinadas a la elaboración de chocolate y otros productos derivados. Durante este periodo se generan los precursores de aroma y sabor, compuestos que posteriormente se desarrollan durante el procesamiento industrial y que son responsables de las características organolépticas del cacao.

En el manejo poscosecha del cacao se identifican tres etapas críticas principales: fermentación, secado y tostado, las cuales influyen directamente en la formación de compuestos aromáticos, la reducción de sabores indeseables y la estabilización del grano. Cada una de estas etapas desempeña un papel específico dentro del proceso de transformación de las almendras de cacao.

La fermentación es considerada la fase más importante del proceso poscosecha, debido a que durante este periodo ocurren múltiples reacciones microbiológicas y bioquímicas que favorecen la formación de los compuestos precursores del aroma del chocolate. En esta etapa participan diferentes microorganismos, principalmente levaduras, bacterias lácticas y bacterias acéticas, los cuales degradan los azúcares presentes en el mucílago que rodea las almendras. Este proceso genera calor, cambios en el pH y la liberación de metabolitos que contribuyen a la muerte del embrión y al inicio de reacciones enzimáticas dentro del cotiledón, favoreciendo el desarrollo de compuestos que posteriormente darán origen al aroma característico del cacao.

Posteriormente, las almendras fermentadas son sometidas al proceso de secado, cuyo objetivo principal es reducir el contenido de humedad del grano hasta niveles adecuados para su almacenamiento y comercialización. Esta etapa

permite detener la actividad microbiana y estabilizar las almendras, evitando el desarrollo de mohos y otros microorganismos que puedan deteriorar la calidad del producto. Además, durante el secado continúan ocurriendo algunas reacciones químicas que contribuyen a la formación de compuestos aromáticos y a la reducción de la acidez generada durante la fermentación.

Finalmente, en el proceso industrial se lleva a cabo la etapa de tostado, donde las almendras secas son sometidas a temperaturas elevadas que favorecen reacciones químicas como la reacción de Maillard y la caramelización, responsables de intensificar el aroma, sabor y color característicos del cacao y del chocolate. Durante el tostado se desarrollan compuestos volátiles que aportan notas sensoriales complejas, tales como aromas tostados, frutales y achocolatados.

En conjunto, la calidad final del cacao depende en gran medida de la correcta ejecución y control de estas etapas de postcosecha, ya que un manejo inadecuado puede generar defectos en el grano, como sabores ácidos, amargos o astringentes. Por lo tanto, la aplicación de prácticas adecuadas durante la fermentación, el secado y el tostado permite obtener almendras de cacao con características organolépticas superiores, favoreciendo la producción de chocolate de alta calidad y mayor valor comercial (Ortiz et al., 2025).

1.21.1. Cadmio en el Ecuador

La presencia de cadmio (Cd^{2+}) en los suelos agrícolas constituye actualmente uno de los principales desafíos para la sostenibilidad de diversos sistemas productivos a nivel mundial, particularmente en cultivos tropicales destinados a la exportación. En el caso de Ecuador, esta problemática ha adquirido una especial relevancia debido a la importancia económica y social del cultivo de *Theobroma cacao*, producto emblemático del país y base de una cadena agroexportadora que involucra a miles de pequeños y medianos productores, quienes dependen directamente de esta actividad para su sustento.

Desde el punto de vista geológico, Ecuador se caracteriza por presentar una estructura geodinámica compleja, resultado de la interacción tectónica entre la placa de Nazca y la placa Sudamericana. Este proceso ha dado origen a la formación de la Cordillera de los Andes, una región con intensa actividad

volcánica histórica que ha contribuido a la formación de una amplia diversidad de suelos derivados de materiales volcánicos. Estos suelos, conocidos comúnmente como andosoles o suelos volcánicos, presentan propiedades fisicoquímicas particulares que influyen en la dinámica de diversos elementos químicos presentes en el suelo, incluyendo metales pesados como el cadmio.

Los suelos de origen volcánico suelen estar formados a partir de rocas madre ricas en minerales, cenizas volcánicas, rocas fosfóricas y materiales piroclásticos, los cuales pueden contener naturalmente trazas de metales pesados. Este origen geológico hace que el cadmio esté presente de forma geogénica, es decir, derivado de la composición natural del material parental del suelo. En consecuencia, en muchas regiones agrícolas del país, la presencia de cadmio no necesariamente responde a procesos de contaminación industrial o actividades humanas directas, sino que está relacionada con la composición mineralógica natural de los suelos agrícolas ecuatorianos.

En este contexto, procesos naturales como la meteorización de rocas, la disolución mineral, la actividad microbiana del suelo y la dinámica geoquímica de los elementos pueden liberar cadmio desde los minerales primarios hacia las fracciones más disponibles del suelo. A lo largo del tiempo, estos procesos pueden favorecer la incorporación gradual del metal en el sistema suelo-planta, especialmente en ambientes tropicales donde factores como la elevada precipitación, la lixiviación intensa y la acidez del suelo contribuyen a modificar la movilidad de los metales pesados.

Sin embargo, además del origen natural o geogénico, diversos factores antropogénicos también pueden contribuir al incremento de la concentración de cadmio en los sistemas agrícolas. La contaminación antropogénica se refiere a la introducción de contaminantes en el ambiente como consecuencia de las actividades humanas. En los sistemas agrícolas, uno de los principales factores asociados a este tipo de contaminación es el uso prolongado de fertilizantes fosfatados. Muchos fertilizantes utilizados en la agricultura moderna se elaboran a partir de rocas fosfóricas sedimentarias, las cuales contienen pequeñas concentraciones de cadmio como impureza natural. Cuando estos fertilizantes se aplican de manera continua durante largos periodos, el cadmio puede

acumularse progresivamente en el suelo, incrementando su disponibilidad para las plantas (Arguello et al., 2019).

Adicionalmente, otras prácticas agrícolas como la aplicación intensiva de agroquímicos, pesticidas, fertilizantes sintéticos, manejo inadecuado de residuos agrícolas y el uso de aguas de riego contaminadas pueden contribuir indirectamente a modificar las propiedades químicas del suelo, favoreciendo la liberación de metales pesados previamente retenidos en las partículas del suelo. Asimismo, actividades industriales, emisiones atmosféricas provenientes de la combustión de combustibles fósiles, deposición de partículas contaminantes y residuos mineros pueden actuar como fuentes adicionales de cadmio en los ecosistemas agrícolas.

En el caso particular de Ecuador, diversos estudios realizados en regiones cacaoteras han evidenciado la presencia de niveles variables de cadmio tanto en suelos como en almendras de cacao, lo que ha despertado un creciente interés científico por comprender los mecanismos que determinan su absorción, acumulación y translocación dentro del cultivo. Investigaciones desarrolladas en diferentes provincias han identificado concentraciones relativamente elevadas de cadmio en zonas productoras ubicadas principalmente en la región litoral, destacándose provincias como Esmeraldas, El Oro, Manabí y Guayas, así como en ciertas áreas de la región amazónica ecuatoriana. Estos resultados coinciden con estudios previos que reportan la presencia del metal en fincas cacaoteras y en granos de cacao provenientes de diferentes localidades del país (Mite et al., 2010).

La distribución espacial del cadmio en los sistemas cacaoteros ecuatorianos presenta una gran variabilidad regional, lo cual se debe a la interacción de múltiples factores ambientales, edáficos y agronómicos. Entre los factores más relevantes se encuentran el tipo de suelo, el pH, el contenido de materia orgánica, la textura del suelo, la capacidad de intercambio catiónico, la actividad microbiana y las condiciones climáticas locales, los cuales influyen directamente en la movilidad y biodisponibilidad del metal. En determinadas zonas productoras se han reportado valores superiores a 1 mg kg^{-1} de cadmio en almendras de

cacao, lo cual evidencia la necesidad de implementar estrategias de manejo y mitigación que permitan garantizar la inocuidad del producto.

En el cultivo de cacao, el cadmio puede ser absorbido principalmente a través del sistema radicular de la planta, siendo posteriormente transportado hacia diferentes órganos vegetales mediante los procesos fisiológicos de translocación interna. Diversos estudios han demostrado que una fracción significativa del cadmio absorbido puede acumularse en los cotiledones o almendras del cacao, que constituyen la parte utilizada en la elaboración de chocolate y otros productos derivados. Esta acumulación representa un desafío importante para la comercialización internacional del grano, especialmente en mercados donde existen regulaciones estrictas sobre la presencia de metales pesados en alimentos.

A nivel internacional, organismos reguladores como la European Food Safety Authority y la Codex Alimentarius Commission han establecido límites máximos permisibles para el contenido de cadmio en productos derivados del cacao y chocolate, con el objetivo de proteger la salud del consumidor. Estas regulaciones han generado una creciente preocupación en países productores de cacao, particularmente en aquellos donde el metal está presente de forma natural en los suelos.

Desde una perspectiva toxicológica, el cadmio es considerado un metal pesado altamente tóxico y bioacumulativo, capaz de generar efectos adversos en la salud humana cuando se ingiere de manera prolongada a través de alimentos contaminados. Una de las características más preocupantes de este metal es su larga vida media biológica, la cual puede oscilar entre 10 y 35 años dentro del organismo humano, dependiendo de la exposición y de las condiciones fisiológicas del individuo. Una vez que el cadmio ingresa al cuerpo, tiende a acumularse principalmente en riñones, hígado y tejidos óseos, donde puede permanecer durante largos periodos de tiempo debido a la limitada capacidad del organismo para eliminarlo de forma eficiente (Chancay et al., 2022).

Las vías de exposición al cadmio pueden ser diversas. Además del consumo de alimentos contaminados, la exposición también puede ocurrir a través de la inhalación de partículas presentes en el aire, el consumo de agua contaminada

o el contacto directo con suelos que contienen concentraciones elevadas del metal. En poblaciones agrícolas o en regiones donde el cadmio está presente en el ambiente, estas vías pueden contribuir significativamente a la acumulación del metal en el organismo.

La exposición crónica a cadmio puede provocar una amplia variedad de efectos adversos para la salud humana. Entre los principales impactos se encuentran daños en el sistema renal, trastornos respiratorios, anemia, hipertensión arterial, alteraciones metabólicas y desmineralización del tejido óseo. Asimismo, el cadmio puede interferir con el metabolismo de minerales esenciales como el calcio y el zinc, lo que puede agravar los efectos tóxicos en el organismo.

Uno de los casos históricos más emblemáticos relacionados con la intoxicación por cadmio es la denominada Enfermedad Itai-Itai, registrada en Japón durante el siglo XX. Esta enfermedad fue causada por la contaminación de cultivos de arroz con cadmio proveniente de actividades mineras en la cuenca del río Jinzu. La población local desarrolló síntomas graves caracterizados por dolores óseos intensos, fragilidad extrema del sistema esquelético, fracturas frecuentes y deterioro progresivo de los huesos, debido a la acumulación prolongada del metal en el organismo (Orozco et al., 2021).

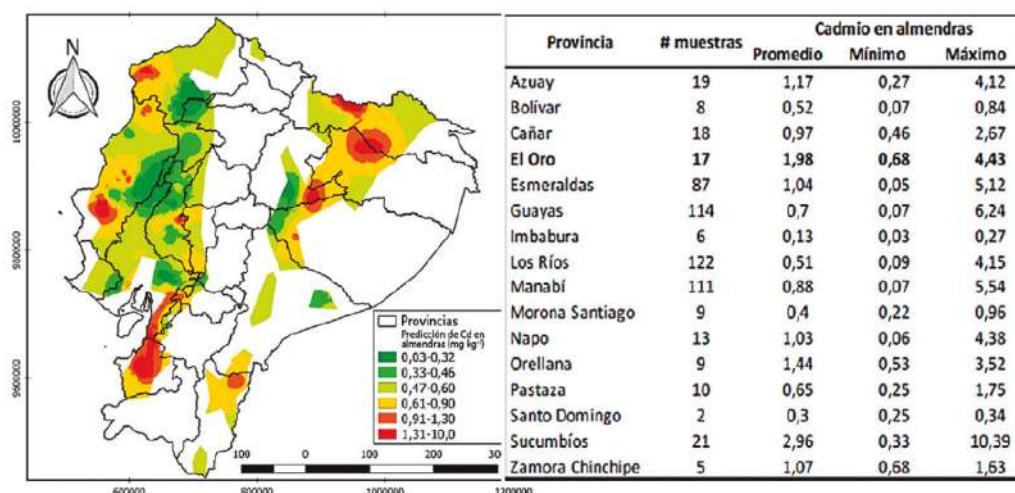
Debido a estos riesgos, la comunidad científica ha incrementado significativamente los esfuerzos de investigación orientados al desarrollo de estrategias de mitigación que permitan reducir la disponibilidad y acumulación del cadmio en los cultivos agrícolas. En el caso del cacao, estas estrategias incluyen enfoques agronómicos, microbiológicos, biotecnológicos y edáficos, que buscan disminuir la absorción del metal por parte de las plantas o limitar su translocación hacia las almendras.

Entre las estrategias actualmente estudiadas se encuentran el uso de enmiendas del suelo, biochar, microorganismos eficientes, micorrizas arbusculares, bacterias promotoras del crecimiento vegetal, prácticas de manejo agronómico y tecnologías de fermentación controlada, las cuales buscan modificar las condiciones del suelo o del proceso poscosecha con el fin de reducir la biodisponibilidad del cadmio.

En este contexto, la generación de conocimiento científico sobre la dinámica del cadmio en los sistemas cacaoteros ecuatorianos resulta fundamental para diseñar estrategias integrales de manejo que permitan garantizar la calidad e inocuidad del cacao ecuatoriano. La comprensión de los factores geológicos, edáficos, agronómicos, microbiológicos y ambientales que influyen en la acumulación de cadmio permitirá desarrollar soluciones sostenibles que contribuyan a mantener la competitividad del cacao ecuatoriano en los mercados internacionales y asegurar la permanencia de este cultivo como uno de los pilares fundamentales de la economía agrícola del país.

Figura 10

Distribución geográfica de la concentración de cadmio en almendras de cacao



Nota: Determinación de cadmio en varias Provincias del Ecuador (Arguello et al., 2019).

1.22. Uso de microorganismos

El empleo de microorganismos en sistemas agrícolas y procesos poscosecha ha cobrado gran relevancia como estrategia biotecnológica para la remediación de contaminantes y la mejora de la calidad de los productos agrícolas. En el caso del cultivo de *Theobroma cacao* L., la utilización de microorganismos puede plantearse desde dos enfoques principales: remediación directa e indirecta. La remediación directa se orienta a intervenir durante el proceso poscosecha, particularmente en la masa fermentativa de las almendras de cacao, mientras que la remediación indirecta se enfoca en la aplicación de microorganismos en

el sistema suelo–planta, buscando reducir la disponibilidad de metales pesados desde el entorno agrícola.

En el caso de las estrategias aplicadas a nivel de planta, la incorporación de microorganismos benéficos puede realizarse mediante aplicaciones foliares o en el suelo, con el objetivo de favorecer procesos biológicos que contribuyan a inmovilizar, transformar o reducir la biodisponibilidad de metales pesados presentes en el suelo. Sin embargo, este tipo de intervenciones suele requerir periodos prolongados de tiempo, que en algunos casos pueden extenderse por varios años antes de evidenciar reducciones significativas en las concentraciones de metales pesados presentes en los tejidos vegetales.

Por otra parte, la aplicación de microorganismos durante el proceso fermentativo del cacao ha sido objeto de diversas investigaciones, debido a su potencial para influir en las transformaciones bioquímicas que ocurren dentro de la masa fermentativa. Estudios recientes han señalado que la utilización de levaduras, bacterias y enzimas puede favorecer procesos de adsorción, complejación o transformación de ciertos metales, lo que podría contribuir a la reducción de las concentraciones de cadmio en las almendras de cacao. Además, la actividad microbiana durante la fermentación puede mejorar el desarrollo de compuestos precursores del aroma y sabor, influyendo positivamente en las propiedades organolépticas del cacao (Chávez et al., 2022).

En este contexto, el uso de consorcios microbianos y bioinsumos representa una alternativa prometedora dentro de las estrategias de mitigación de contaminantes en sistemas cacaoteros. Estas tecnologías biológicas permiten integrar procesos de biotransformación, bioadsorción y mejora del proceso fermentativo, contribuyendo no solo a la reducción de metales pesados, sino también al fortalecimiento de la calidad y valor agregado del cacao destinado a la industria chocolatera.

1.22.1. Levaduras (*Saccharomyces cerevisiae*)

Las levaduras del género *Saccharomyces*, particularmente *Saccharomyces cerevisiae*, desempeñan un papel fundamental en diversos procesos fermentativos utilizados en la industria alimentaria y biotecnológica. Este microorganismo es ampliamente reconocido por su capacidad para metabolizar

azúcares y producir compuestos como etanol, dióxido de carbono y metabolitos secundarios, los cuales participan activamente en las transformaciones bioquímicas que ocurren durante la fermentación de alimentos.

En sistemas donde existe la presencia de metales pesados como el cadmio (Cd), ciertos microorganismos, incluyendo algunas levaduras, pueden desarrollar mecanismos de tolerancia y biosorción, mediante los cuales son capaces de interactuar con los iones metálicos presentes en el medio. Estos mecanismos pueden involucrar procesos de adsorción en la pared celular, bioacumulación intracelular o complejación con compuestos orgánicos, lo que contribuye a disminuir la biodisponibilidad del metal en el entorno donde se desarrollan (Peñalba et al., 2022).

Durante el proceso fermentativo del cacao, *Saccharomyces cerevisiae* participa activamente en la fase alcohólica de la fermentación, etapa que generalmente ocurre durante los primeros días del proceso. En esta fase, las levaduras metabolizan los azúcares presentes en el mucílago que recubre las almendras de cacao, produciendo etanol y otros compuestos que favorecen el desarrollo posterior de bacterias acéticas. La actividad de estos microorganismos contribuye a generar las condiciones necesarias para que ocurran las transformaciones microbiológicas y bioquímicas responsables del desarrollo de las características sensoriales del cacao (Alvarado et al., 2022).

Además, durante la fermentación, las levaduras pueden adherirse a la superficie de los cotiledones de las almendras de cacao, participando en las interacciones microbianas que se desarrollan dentro de la masa fermentativa. Estas interacciones microbianas, junto con las reacciones químicas asociadas a las fases alcohólica y acética de la fermentación, influyen en la descomposición del mucílago, la generación de calor y la modificación de compuestos internos del grano, factores que contribuyen al desarrollo del aroma, sabor y color característicos del cacao fermentado.

1.22.2. Lactobacillus Casei

Lactobacillus casei es una bacteria ácido láctica ampliamente estudiada en procesos fermentativos debido a sus propiedades probióticas y metabólicas, así como a su capacidad de interactuar con diversos compuestos presentes en los

sistemas biológicos. Este microorganismo pertenece al grupo de bacterias Gram positivas y se caracteriza por participar activamente en procesos fermentativos donde predomina la producción de ácido láctico, contribuyendo a la modificación del pH del medio y al desarrollo de condiciones favorables para otros microorganismos involucrados en la fermentación.

En contextos ambientales y biotecnológicos, se ha observado que algunas bacterias lácticas, entre ellas *Lactobacillus casei*, poseen la capacidad de interactuar con metales pesados presentes en el medio, incluyendo cadmio. Estos microorganismos pueden desarrollar mecanismos de biosorción, bioacumulación o complejación, mediante los cuales los iones metálicos pueden adherirse a la superficie celular o ser retenidos por estructuras de la pared bacteriana. Este proceso puede contribuir a disminuir la biodisponibilidad y toxicidad de ciertos metales pesados, lo que ha despertado interés en su aplicación en procesos de biorremediación (López, 2019).

Durante la fermentación del cacao, las bacterias ácido lácticas forman parte del consorcio microbiano natural que se desarrolla en la masa fermentativa. Estas bacterias intervienen en una fase específica del proceso fermentativo, donde contribuyen a la acidificación del medio y a la transformación de compuestos presentes en el mucílago y en el interior del grano. El metabolismo de estas bacterias influye en la dinámica microbiana del sistema fermentativo y en las condiciones fisicoquímicas del medio, factores que afectan el desarrollo de las transformaciones bioquímicas dentro de las almendras de cacao.

Investigaciones relacionadas con el uso de bacterias probióticas en ambientes contaminados han demostrado que ciertos microorganismos poseen tolerancia a metales pesados, desarrollando mecanismos celulares que permiten la retención o interacción con estos elementos dentro del medio biológico. En algunos estudios se ha observado que estas bacterias pueden formar estructuras o barreras celulares que facilitan la retención intracelular o superficial de metales, lo que contribuye a disminuir su concentración en el medio circundante. Este tipo de mecanismos ha sido reportado en investigaciones relacionadas con el tratamiento de aguas residuales contaminadas con metales

pesados, donde se ha evidenciado la capacidad de ciertos microorganismos para interactuar con estos contaminantes (Balboa & Vergara, 2021).

En el contexto de la fermentación del cacao, la presencia de bacterias como *Lactobacillus casei* puede contribuir al acondicionamiento del medio fermentativo, favoreciendo la transformación de compuestos presentes en las almendras y en el mucílago. Además, la interacción de estos microorganismos con el sistema fermentativo puede influir en la penetración de metabolitos hacia el interior del grano, participando en los procesos que determinan la calidad química y sensorial de las almendras fermentadas (Balboa & Vergara, 2021).

1.22.3. Azospirillum brasilense

Azospirillum brasilense es una bacteria Gram negativa asociada al suelo, ampliamente estudiada por su capacidad de establecer relaciones beneficiosas con diversas especies vegetales. Este microorganismo fue aislado por primera vez en Brasil durante la década de 1970, lo que dio origen a su denominación científica. Desde entonces, se ha convertido en uno de los microorganismos más investigados dentro del grupo de bacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR, *Plant Growth Promoting Rhizobacteria*), debido a su capacidad de mejorar el desarrollo y la productividad de distintos cultivos agrícolas.

Una de las características más relevantes de *Azospirillum brasilense* es su capacidad para colonizar la rizosfera y la superficie de las raíces de las plantas, donde puede establecer interacciones simbióticas o asociativas. Durante este proceso, la bacteria contribuye a mejorar la absorción de nutrientes, estimular el crecimiento radicular y favorecer la disponibilidad de compuestos minerales en el suelo. Además, algunas cepas presentan tolerancia a condiciones ambientales adversas, incluyendo suelos afectados por el uso intensivo de fertilizantes químicos, pesticidas y otros insumos agrícolas, que en muchos casos pueden contener trazas de metales pesados (Urley et al., 2019).

En sistemas agrícolas sometidos a estrés ambiental o contaminación por compuestos químicos, la inoculación de microorganismos como *Azospirillum brasilense* puede contribuir a mejorar las condiciones del suelo y el desarrollo de las plantas. Este microorganismo puede estimular la formación de estructuras radiculares más desarrolladas, favoreciendo la exploración del suelo y la

absorción de nutrientes esenciales. Asimismo, se ha reportado que algunas cepas poseen la capacidad de interactuar con compuestos minerales del suelo, incluyendo fosfatos, contribuyendo a mejorar su disponibilidad para las plantas.

En investigaciones realizadas en diferentes cultivos, la aplicación de *Azospirillum brasilense* ha demostrado efectos positivos en el crecimiento vegetal, la resistencia a ciertos patógenos y la tolerancia a condiciones de estrés. Por ejemplo, en cultivos hortícolas como el tomate, estudios han señalado que la inoculación con este tipo de bacterias puede contribuir a mejorar la vigorosidad de las plantas y la resistencia frente a ciertos patógenos del suelo, como el hongo *Sclerotium rolfsii*, el cual puede generar pérdidas significativas en la producción agrícola (Urley et al., 2019).

Debido a estas características, *Azospirillum brasilense* ha sido considerado un microorganismo de interés en programas de manejo sostenible de suelos agrícolas, ya que su utilización puede contribuir a reducir la dependencia de insumos químicos, mejorar la fertilidad del suelo y favorecer prácticas agrícolas más sostenibles. En cultivos de importancia económica como el cacao, el estudio de estos microorganismos representa una alternativa prometedora para mejorar las condiciones del sistema suelo-planta y apoyar estrategias orientadas a la mitigación de contaminantes y al fortalecimiento de la productividad agrícola.

1.22.4. Azotobacter chroococcum

Azotobacter chroococcum es una bacteria de vida libre perteneciente al grupo de las bacterias fijadoras de nitrógeno, ampliamente reconocida por su importancia en la fertilidad del suelo y en la promoción del crecimiento vegetal. Este microorganismo se encuentra de manera natural en diferentes tipos de suelos agrícolas y se caracteriza por su capacidad de fijar nitrógeno atmosférico, transformándolo en formas asimilables por las plantas, lo que contribuye a mejorar la disponibilidad de este nutriente esencial para el desarrollo vegetal.

En la agricultura sostenible, *Azotobacter chroococcum* es considerada una bacteria promotora del crecimiento de las plantas, ya que además de participar en la fijación biológica de nitrógeno, puede estimular procesos fisiológicos que favorecen el crecimiento radicular y el desarrollo general de los cultivos. Este microorganismo también puede producir sustancias bioactivas como

fitohormonas, vitaminas y compuestos orgánicos, los cuales influyen positivamente en la salud del suelo y en el vigor de las plantas.

Otro aspecto relevante de *Azotobacter chroococcum* es su capacidad para contribuir al equilibrio biológico del suelo, ayudando a mejorar la estructura y fertilidad del mismo. En suelos que han sido sometidos durante largos periodos al uso intensivo de fertilizantes químicos y agroquímicos, la aplicación de este tipo de microorganismos puede favorecer procesos biológicos que ayudan a restablecer la actividad microbiana natural del suelo, contribuyendo a reducir los efectos negativos asociados al uso prolongado de insumos químicos (Sánchez et al., 2019).

Debido a estas propiedades, *Azotobacter chroococcum* es frecuentemente utilizada en la formulación de biofertilizantes y bioinsumos agrícolas, los cuales se emplean como alternativas más sostenibles dentro de los sistemas de producción agrícola. Su uso permite mejorar la eficiencia en el aprovechamiento de nutrientes, estimular el crecimiento de los cultivos y promover prácticas agrícolas orientadas a la reducción del uso de fertilizantes sintéticos, favoreciendo así la sostenibilidad de los sistemas productivos.

1.22.5. Lactobacillus acidophilus

Lactobacillus acidophilus es una bacteria ácido láctica Gram positiva ampliamente conocida por sus propiedades probióticas y su participación en diversos procesos fermentativos, especialmente en la industria alimentaria. Este microorganismo se encuentra de forma natural en ambientes ricos en materia orgánica y también forma parte de la microbiota presente en diferentes alimentos fermentados. Debido a su capacidad metabólica, ha sido objeto de numerosos estudios relacionados con la interacción entre microorganismos y contaminantes ambientales, particularmente metales pesados.

La contaminación por metales como plomo (Pb) y cadmio (Cd^{2+}) puede ocurrir a través de diferentes vías ambientales, incluyendo el suelo, el agua y la atmósfera, lo que facilita su incorporación en los sistemas agrícolas y en la cadena alimentaria. En este contexto, ciertas bacterias ácido lácticas, como *Lactobacillus acidophilus*, han demostrado poseer mecanismos biológicos que les permiten interactuar con estos metales presentes en el medio. Entre estos

mecanismos se incluyen procesos de biosorción y bioacumulación, mediante los cuales los iones metálicos pueden adherirse a la superficie celular o ser retenidos en estructuras bacterianas, reduciendo su disponibilidad en el entorno.

Diversos estudios han analizado la capacidad de bacterias probióticas para reducir la concentración de metales pesados en sistemas biológicos o alimentarios. En investigaciones realizadas en productos lácteos, se ha observado que la presencia de *Lactobacillus acidophilus* puede contribuir a la interacción con metales como el cadmio y el plomo, evidenciando una reducción significativa de estos contaminantes tras periodos de incubación. En algunos ensayos experimentales, realizados durante aproximadamente cuatro días de exposición, se reportó una disminución considerable en la concentración de metales pesados en el medio, asociada a la actividad metabólica de estas bacterias, alcanzando reducciones cercanas al 70–80 % bajo determinadas condiciones experimentales (Massoud et al., 2020).

Estas propiedades han despertado interés en el uso de bacterias ácido lácticas como agentes potenciales en procesos de biorremediación o biotecnología ambiental, debido a su capacidad de interactuar con contaminantes y modificar su disponibilidad en diferentes sistemas. En contextos agrícolas y fermentativos, el estudio de microorganismos como *Lactobacillus acidophilus* contribuye a ampliar el conocimiento sobre estrategias biológicas para la mitigación de metales pesados, así como su posible aplicación en procesos orientados a mejorar la inocuidad y calidad de los alimentos.

1.22.6. Rhizobiun japonicum

Rhizobium japonicum es una bacteria Gram negativa perteneciente al grupo de las proteobacterias alfa, reconocida por su capacidad de establecer relaciones simbióticas con las raíces de ciertas plantas, especialmente aquellas que forman nódulos radiculares. Este microorganismo forma parte de la familia de los rizobios, bacterias ampliamente estudiadas por su capacidad de fijar nitrógeno atmosférico, transformándolo en formas disponibles para las plantas, lo que contribuye al mejoramiento de la fertilidad del suelo y al desarrollo de los cultivos.

Debido a esta característica, *Rhizobium japonicum* es utilizado en la agricultura como biofertilizante, ya que permite mejorar la nutrición nitrogenada de las

plantas sin generar efectos negativos sobre el suelo o el ambiente. La actividad biológica de este microorganismo favorece la formación de nódulos en las raíces, estructuras donde ocurre el proceso de fijación biológica de nitrógeno, permitiendo que las plantas dispongan de este nutriente esencial para su crecimiento y desarrollo.

En investigaciones relacionadas con sistemas agrícolas sostenibles, se ha evaluado el potencial de microorganismos como *Rhizobium japonicum* en procesos asociados a la biorremediación de suelos contaminados con metales pesados. Algunos estudios sugieren que ciertos microorganismos del suelo pueden participar en procesos de interacción, inmovilización o transformación de metales presentes en el entorno, contribuyendo a reducir su disponibilidad para las plantas.

En el contexto del procesamiento del cacao, se ha planteado la posibilidad de incorporar microorganismos benéficos en la masa fermentativa de las almendras frescas, con el propósito de estimular procesos microbiológicos que favorezcan la calidad del cacao. En este sentido, la presencia de microorganismos como *Rhizobium japonicum* podría contribuir indirectamente al equilibrio microbiológico del sistema fermentativo, favoreciendo condiciones que permitan mejorar el desarrollo de la fermentación y potenciar las características sensoriales del grano, tales como aroma, sabor y uniformidad en el grado de fermentación. Asimismo, se ha planteado que la interacción microbiana en estos sistemas podría contribuir a reducir la presencia o biodisponibilidad de ciertos metales pesados, incluyendo el cadmio, dentro del sistema fermentativo del cacao (Vásquez et al., 2022).

The background features a light blue and white geometric pattern of overlapping squares and rectangles. In the bottom right corner, there is a faint, stylized molecular structure composed of grey circles connected by thin lines.

CAPITULO 2

DISEÑO METODOLÓGICO

Diseño metodológico

2.1. Localización

Las mazorcas de cacao de la variedad CCN-51 utilizadas en la presente investigación fueron recolectadas en dos unidades productivas cacaoteras ubicadas en la región costera del Ecuador, pertenecientes a dos provincias con amplia tradición en la producción de (*Theobroma cacao* L.). Estas zonas se caracterizan por presentar condiciones climáticas tropicales favorables para el desarrollo del cultivo, incluyendo temperaturas cálidas, elevada humedad relativa y precipitaciones que favorecen el crecimiento vegetativo del cacao.

La primera finca se localiza en una zona productora de cacao de la provincia de Manabí, dentro de un sistema agrícola representativo de la región costera ecuatoriana. Esta área presenta condiciones agroclimáticas adecuadas para el cultivo de cacao, con temperaturas medias que oscilan entre 24 y 28 °C, suelos aptos para la producción agrícola y precipitaciones moderadas características del litoral ecuatoriano.

La segunda finca corresponde a una unidad productiva ubicada en la provincia de Esmeraldas, también en la región costera del país, donde el cultivo de cacao constituye una actividad agrícola relevante para la economía local. En esta zona predominan condiciones de clima tropical húmedo, con temperaturas promedio cercanas a 25 °C y precipitaciones anuales que favorecen el establecimiento y desarrollo de plantaciones cacaoteras.

Los análisis físico-químicos de las almendras de cacao se realizaron en los laboratorios de una institución universitaria pública de la región costera ecuatoriana, especializada en investigación agropecuaria y estudios relacionados con la producción agrícola y agroindustrial. Estas instalaciones cuentan con equipos y metodologías adecuadas para la evaluación de parámetros fisicoquímicos del cacao.

Por otra parte, la determinación del contenido de cadmio (Cd) en las muestras de cacao se efectuó en un laboratorio acreditado de investigación agropecuaria

del Ecuador, perteneciente a una institución nacional dedicada al desarrollo científico y tecnológico del sector agrícola. Este laboratorio cuenta con certificaciones y protocolos analíticos validados para la determinación de metales pesados en matrices agrícolas, garantizando la confiabilidad de los resultados obtenidos en el estudio.

2.2. Tipo de investigación

2.2.1. Método Descriptivo

La presente investigación se desarrolló bajo un enfoque descriptivo, el cual permite identificar, analizar y caracterizar las propiedades, comportamientos y condiciones relacionadas con un fenómeno de estudio específico. Este tipo de método facilita la observación sistemática y el análisis detallado de los procesos involucrados, con el propósito de comprender las variables que intervienen en el desarrollo del problema investigado.

En este contexto, el método descriptivo permitió examinar las características y cambios que ocurren durante el proceso poscosecha del cacao, particularmente en la etapa fermentativa de las almendras, evaluando las condiciones fisicoquímicas y microbiológicas que influyen en la calidad del grano. Asimismo, este enfoque facilitó la descripción de las interacciones generadas por la aplicación de microorganismos y extractos frutales dentro de la masa fermentativa, permitiendo analizar su posible efecto en la reducción o mitigación de la presencia de cadmio en las almendras de cacao.

De esta manera, el método descriptivo contribuyó a documentar y analizar los procesos observados durante el desarrollo experimental, permitiendo establecer relaciones entre las variables evaluadas y los resultados obtenidos en la investigación, lo que facilita la interpretación de los fenómenos asociados al manejo poscosecha del cacao (Gauchi, 2017; Ramos, 2015).

2.2.2. Método Explicativo

El método explicativo se empleó en la presente investigación con el propósito de analizar e interpretar las relaciones existentes entre las variables de estudio,

permitiendo comprender las causas y efectos asociados a los fenómenos observados durante el desarrollo del experimento. Este enfoque metodológico facilita no solo la descripción de los procesos, sino también la interpretación de los mecanismos que influyen en los resultados obtenidos, lo que permite establecer explicaciones fundamentadas sobre el comportamiento de las variables evaluadas.

En este contexto, la aplicación del método explicativo permitió analizar los efectos generados por la incorporación de microorganismos y extractos frutales en la masa fermentativa de las almendras de cacao, así como su posible influencia en la reducción de la concentración de cadmio y en la calidad de las almendras durante el proceso poscosecha. De esta manera, el método contribuyó a comprender cómo las condiciones experimentales y las interacciones microbiológicas pueden incidir en los cambios observados dentro del sistema fermentativo.

Asimismo, este enfoque permitió dar respuesta a las interrogantes planteadas en la investigación, interpretando los resultados obtenidos a partir de los parámetros evaluados y estableciendo relaciones entre las variables analizadas. De esta forma, el método explicativo facilitó la comprensión de los procesos experimentales desarrollados y de los fenómenos que se presentan durante la fermentación del cacao, permitiendo fundamentar científicamente los resultados obtenidos en el estudio (Corona, 2016; Rodríguez & Pérez, 2017; Pulido, 2015).

2.3. Métodos de investigación

2.3.1. Método Inductivo

El método inductivo fue utilizado en el desarrollo de la presente investigación con el propósito de analizar los resultados obtenidos a partir de observaciones particulares y experimentales, para posteriormente establecer conclusiones generales relacionadas con el fenómeno estudiado. Este método se basa en la interpretación de datos específicos que permiten generar inferencias y explicar comportamientos observados dentro del proceso investigativo.

En este estudio, el método inductivo se aplicó principalmente durante la etapa de poscosecha del cacao, específicamente en el proceso fermentativo de las almendras, donde se incorporaron técnicas innovadoras basadas en la aplicación de microorganismos y extractos frutales dentro de la masa fermentativa. A partir de la evaluación de los resultados experimentales obtenidos en cada tratamiento, fue posible analizar el comportamiento de las variables relacionadas con la calidad del cacao y la concentración de cadmio presente en las almendras.

De esta manera, mediante el análisis de los resultados particulares obtenidos durante el proceso experimental, se pudieron establecer interpretaciones y conclusiones generales sobre la efectividad de las estrategias aplicadas, orientadas a mejorar la calidad del cacao y a reducir los niveles de cadmio presentes en las almendras, procurando que estos se mantengan por debajo de los límites establecidos por la normativa de la Unión Europea para productos derivados del cacao (Rodríguez & Pérez, 2017; Pulido, 2015).

2.3.2. Método Estadístico

El método estadístico fue utilizado en la presente investigación con el objetivo de analizar, organizar e interpretar los datos obtenidos durante el desarrollo experimental. Este enfoque permitió procesar la información generada a partir de las variables evaluadas, facilitando la comparación de los tratamientos aplicados y la identificación de posibles diferencias significativas entre los resultados obtenidos.

Para el procesamiento y análisis de los datos experimentales se empleó el software estadístico InfoStat, herramienta ampliamente utilizada en investigaciones agrícolas y experimentales. Este programa permitió realizar el análisis estadístico de los datos recolectados, incluyendo la organización de la información, el análisis de varianza y la comparación de medias entre los tratamientos evaluados.

La aplicación del método estadístico permitió interpretar de manera objetiva los resultados obtenidos, garantizando la confiabilidad de la información generada durante la investigación y facilitando la evaluación del efecto de los tratamientos aplicados en la fermentación de las almendras de cacao y en la reducción del

contenido de cadmio presente en las muestras analizadas (Rodríguez & Pérez, 2017; Pulido, 2015).

2.3.3. Método Experimental

El método experimental fue aplicado en la presente investigación con el objetivo de evaluar el efecto de los tratamientos implementados sobre las variables de estudio, mediante la manipulación controlada de los factores experimentales. Este enfoque permitió analizar el comportamiento del sistema fermentativo del cacao frente a la aplicación de microorganismos eficientes y extractos de frutas, así como su posible influencia en la calidad de las almendras y en la reducción del contenido de cadmio.

Para el procesamiento y análisis de los datos obtenidos se empleó un modelo estadístico basado en el análisis de varianza (ANOVA), el cual permitió comparar los efectos de los factores estudiados y determinar la existencia de diferencias significativas o no significativas entre los tratamientos evaluados. Este procedimiento facilitó la interpretación de la influencia de cada variable dentro del experimento.

La aplicación del método experimental permitió evaluar de manera objetiva los resultados obtenidos, proporcionando un respaldo estadístico que permitió interpretar los datos generados durante la investigación y establecer conclusiones relacionadas con el efecto de los tratamientos aplicados en la fermentación de las almendras de cacao y su posible incidencia en la disminución del contenido de cadmio en las muestras analizadas (Acevedo et al., 2013; Pulido, 2015).

2.4. Fuentes de recopilación de información

La presente investigación se sustentó en la recopilación de información proveniente de fuentes primarias y secundarias, las cuales permitieron fortalecer el desarrollo teórico y metodológico del estudio. Las fuentes primarias correspondieron a los datos obtenidos directamente durante el desarrollo de la investigación, mediante observaciones de campo, registros experimentales y análisis de laboratorio, relacionados con el proceso fermentativo de las

almendras de cacao y la evaluación del contenido de cadmio en las muestras analizadas.

Por otra parte, se utilizaron fuentes secundarias de información, las cuales permitieron complementar y respaldar científicamente el trabajo investigativo. Estas fuentes incluyeron artículos científicos publicados en revistas nacionales e internacionales indexadas, libros especializados, editoriales académicas, informes de investigación y tesis de grado y posgrado, provenientes de universidades e instituciones de investigación tanto nacionales como internacionales.

La revisión y análisis de estas fuentes permitieron sustentar conceptualmente el problema de investigación, contextualizar los resultados obtenidos y establecer comparaciones con estudios previos, contribuyendo así a fortalecer la validez científica del estudio (Orellana et al., 2006).

2.5. Diseño de investigación

En la presente investigación se empleó un Diseño Completamente al Azar (DCA) con arreglo trifactorial, con el propósito de evaluar el efecto de los tratamientos aplicados sobre las variables de estudio relacionadas con la fermentación de las almendras de cacao y la disminución del contenido de cadmio.

El experimento se estructuró bajo un modelo trifactorial $2 \times 2 \times 2$, al cual se adicionaron dos tratamientos testigo, resultando un total de 10 tratamientos experimentales, cada uno con tres repeticiones. Los testigos correspondieron a muestras sin aplicación de microorganismos ni extractos de frutas, uno proveniente de cada zona productora evaluada.

Los factores considerados en el diseño experimental fueron los siguientes:

- Factor A: Microorganismos eficientes, con dos niveles:
 - Albiobatch
 - Comercial

Estos microorganismos fueron aplicados a una concentración del 20 % (400 mL) por cada 2 kg de masa fermentativa de cacao.

- Factor B: Tipo de extracto de fruta, con dos niveles:
 - Extracto de banano
 - Extracto de manzana

Los extractos se aplicaron a una concentración del 3 % (60 mL) por cada 2 kg de masa fermentativa.

- Factor C: Procedencia del cacao, correspondiente a dos zonas productoras del Ecuador, pertenecientes a las provincias de Manabí y Esmeraldas.

Este diseño experimental permitió evaluar de manera simultánea el efecto individual de cada factor y sus posibles interacciones, con el objetivo de determinar la influencia de los microorganismos eficientes y los extractos de frutas en la reducción del contenido de cadmio y en la calidad de las almendras de cacao durante el proceso fermentativo.

2.5.1. Esquema de ANDEVA

Tabla 3
Estructura de Andeva

Fuente de Variación		Grados de Libertad
Tratamientos	t-1	7
Testigo 1		1
Testigo 2		1
Factor Microorganismos	(me-1)	1
Factor Extracto de frutas	(Extract-1)	1
Factor Provincias	(pro-1)	1
Int ME* Extract	(me-1) (Extract-1)	1
Int ME*Provincias	(Me-1)(p-1)	1
Int Extract* Provincia	(Extract-1)(p-1)	1
Int Mo* Extract*Provincia	(Mo-1)(Extract-1)(Pro-1)	1
Error Experimental	(me* Extract*pro) (r-1)	16
Total	me* Extract*pro*r-1	23

Nota: (Autores, 2026).

Para el procesamiento y análisis de los datos obtenidos durante el desarrollo de la investigación se realizó un Análisis de Varianza (ANDEVA), con el objetivo de evaluar el efecto de los tratamientos aplicados sobre las variables de estudio y determinar la existencia de diferencias significativas entre los factores evaluados.

Posteriormente, cuando se identificaron diferencias estadísticas entre los tratamientos, las medias fueron comparadas mediante la prueba de Tukey con

un nivel de significancia de $p \leq 0,05$, lo que permitió establecer comparaciones múltiples entre los tratamientos experimentales y determinar cuáles presentaron diferencias significativas.

Todo el procesamiento estadístico de la información se realizó utilizando el software estadístico InfoStat, herramienta ampliamente utilizada en investigaciones experimentales en el área agrícola y agroindustrial, la cual permitió organizar, analizar e interpretar los datos obtenidos durante el estudio.

Tabla 4
Factores y niveles de estudio

Factor Microorganismos eficientes		Factor extracto	Factor fincas Provincias	
Niveles	Mo ₁ (q)	Niveles	Banano	Esmeraldas
	Mo ₂ (2)		Manzana	Manabí

Nota: (Autores, 2026).

2.5.2.Arreglo de tratamiento.

Tabla 5
Arreglo de tratamientos de estudios

Número	Código	Descripción
1	Me ₁ *ext ₁ *p ₁	Microorganismo Albiobacth con Extracto banano en la Provincia de Esmeraldas.
2	Me ₁ * ext ₁ *p ₂	Microorganismo Albiobacth con Extracto banana en la Provincia de Manabí.
3	Me ₁ * ext ₂ *p ₁	Microorganismo Albiobacth con Extracto manzana en la Provincia de Esmeraldas.
4	Me ₁ * ext ₂ *p ₂	Microorganismo Albiobacth con Extracto manzana en la Provincia de Manabí.
5	Me ₂ * ext ₁ *p ₁	Microorganismo Comercial con Extracto banano en la Provincia de Esmeraldas.
6	M ₂ * ext ₁ *p ₂	Microorganismo Comercial con Extracto banano, banano en la provincia de Manabí.
7	M ₂ * ext ₂ *p ₁	Microorganismo COMERCIAL con Extracto manzana en la Provincia de Esmeraldas.
8	M ₂ * ext ₂ *p ₂	Microorganismo COMERCIAL con Extracto manzana, en la Provincia de Manabí.
9	Testigo ₁ vs Todos	Tratamientos sin aplicación Manabí
10	Testigo ₂ vs todos	Tratamiento sin aplicación Esmeraldas

Nota: (Autores, 2026).

2.5.3.Modelo matemático

Para el análisis de los datos obtenidos en el experimento se empleó un modelo matemático correspondiente a un Diseño Completamente al Azar (DCA) con arreglo trifactorial, el cual permitió evaluar el efecto de los factores estudiados y

sus posibles interacciones sobre las variables de respuesta analizadas. Este modelo permitió analizar simultáneamente la influencia de los microorganismos, los extractos de frutas y la procedencia del cacao, así como la interacción entre estos factores dentro del sistema experimental.

El modelo matemático aplicado se expresa de la siguiente manera:

Modelo matemático:

$$Y_{ijkl} = \mu + T_i + A_j + B_k + C_l + (A_j * B_k) + (A_j * C_l) + (B_k * C_l) + (A_j * B_k * C_l) + E_{ijkl}$$

Donde:

Y_{ijkl} = El total de observaciones de estudio.

μ = Media general.

A_j = El efecto (iesimo) de los dos tipos de microorganismo eficientes del factor A.

B_j = El efecto (iotaesimo) de los tipos de Extracto de frutas Banano y Manzana del factor B.

C_j = El efecto (iotaesimo) de las dos Provincias del Ecuador obtiene la materia prima factor C.

$(A*B)$ = El efecto (iesimo) de los dos tipos de microorganismo eficientes del factor A * El efecto (iotaesimo) de los tipos de Extracto de frutas Banano y Manzana del factor B.

$(A*C)$ = El efecto (iesimo) de los dos tipos de microorganismo eficientes del factor A * El efecto (iotaesimo) de las dos Provincias del Ecuador obtiene la materia prima factor C.

$(B*C)$ = El efecto (iotaesimo) de los tipos de Extracto de frutas Banano y Manzana del factor B * El efecto (iotaesimo) de las dos Provincias del Ecuador obtiene la materia prima factor C.

$(A*B*C)$ = El efecto (iesimo) de los dos tipos de microorganismo eficientes del factor A El efecto (iotaesimo) de los tipos de Extracto de frutas Banano y

Manzana del factor B * El efecto (iotaesimo) de las dos Provincias del Ecuador obtiene la materia prima factor C.

E_{ijkl} = Efecto aleatorio error experimental. (Vera & Vera, 2018).

2.6. Instrumento de Investigación

2.6.1. Variables estudiadas

2.6.1.1. Ejecución de la postcosecha

Obtención de las mazorcas de cacao (Materia prima):

Para el desarrollo de la presente investigación se realizó la recolección de mazorcas de cacao como materia prima, considerando criterios de selección que garantizaran la calidad del material vegetal utilizado en el estudio. Durante la cosecha se verificó que las mazorcas se encontraran en adecuado estado fisiológico y sanitario, evitando la recolección de frutos que presentaran síntomas de enfermedades fitosanitarias, especialmente aquellos afectados por moniliasis u otras alteraciones que pudieran comprometer la calidad de las almendras.

Las mazorcas utilizadas en el experimento correspondieron a la variedad de cacao CCN-51 (*Theobroma cacao L.*), una de las variedades ampliamente cultivadas en la región costera del Ecuador debido a su alta productividad y adaptación a diferentes condiciones agroclimáticas. El material vegetal fue recolectado en dos zonas productoras pertenecientes a la región costera del país, ubicadas en las provincias de Esmeraldas y Manabí.

Durante la fase de muestreo se recolectó un total aproximado de 460 mazorcas de cacao, cantidad que permitió obtener el volumen necesario de almendras frescas para la ejecución del proceso fermentativo y el desarrollo de los tratamientos experimentales establecidos en la investigación. Estas mazorcas fueron transportadas posteriormente al área de procesamiento para iniciar las etapas correspondientes al manejo poscosecha y fermentación experimental.

Tabla 6

Registro fotográfico de la obtención de mazorcas de cacao



Obtención de la materia prima (mazorcas de cacao) – finca de Manabí



Obtención de la materia prima (mazorcas de cacao) – finca de Esmeraldas



Mazorcas de cacao recolectadas



Mazorcas de cacao seleccionadas

Nota: (Autores, 2026).

Despulpado:

Una vez recolectadas las mazorcas de cacao necesarias para el desarrollo del experimento, se procedió a realizar el proceso de despulpado, el cual consistió en la extracción manual de las almendras o habas de cacao contenidas en el interior del fruto.

Para facilitar la extracción de las almendras, las mazorcas fueron abiertas mediante un corte longitudinal o transversal, permitiendo separar las habas de cacao de la placenta o eje central del fruto, estructura que mantiene unidas las semillas dentro de la mazorca. Este procedimiento se realizó cuidadosamente

con el fin de evitar daños mecánicos en las almendras, lo cual podría afectar el desarrollo adecuado del proceso fermentativo.

Una vez extraídas, las almendras frescas recubiertas de mucílago fueron separadas de los restos de la placenta y posteriormente colocadas en recipientes limpios, garantizando condiciones higiénicas durante su manipulación. Posteriormente, las almendras fueron distribuidas en las celdas de las cajas micro-fermentadoras, utilizadas para el desarrollo del proceso fermentativo experimental.

Cada una de las celdas de las micro-fermentadoras fue abastecida con aproximadamente 2 kg de masa fresca de cacao, lo que permitió estandarizar la cantidad de material utilizado en cada tratamiento y asegurar condiciones homogéneas durante la fermentación de las almendras.

2.6.1.2. Morfología de evaluación de las mazorcas de cacao

2.6.1.2.1. Peso del fruto de cacao

Para la determinación del peso promedio de las mazorcas de cacao, se procedió a realizar el pesaje individual de los frutos recolectados durante la etapa de cosecha. Este procedimiento se efectuó con el fin de obtener un valor representativo del peso promedio de las mazorcas utilizadas en la investigación.

Posteriormente, el peso total de las mazorcas recolectadas fue dividido entre el número total de frutos sanos, con el objetivo de calcular el peso promedio por mazorca. Este parámetro permitió estimar la variabilidad del material vegetal utilizado y facilitar la caracterización física de la materia prima empleada en el estudio.

La determinación del peso del fruto constituye un indicador importante en la evaluación de características productivas del cacao, ya que permite estimar el rendimiento potencial del fruto en términos de cantidad de almendras obtenidas por mazorca (Fariñas et al., 2002).

2.6.1.2.2. Número de almendras de cacao.

Para la determinación del número de almendras por fruto de cacao, se realizó un conteo directo de las semillas presentes en cada mazorca recolectada. Este

procedimiento consistió en extraer manualmente las almendras de cada fruto y registrar el número total de semillas obtenidas por mazorca.

Posteriormente, con los datos obtenidos se procedió a calcular el promedio del número de almendras por fruto, lo que permitió obtener una estimación representativa del rendimiento de las mazorcas utilizadas en la investigación. Este parámetro constituye un indicador importante en la caracterización física del cacao, ya que permite evaluar la capacidad productiva del fruto y su relación con el rendimiento de almendras durante el proceso poscosecha (Intriago et al., 2019).

2.6.1.2.3. Largo del fruto de cacao

Para la determinación del largo del fruto de cacao, se realizó la medición de cada mazorca considerando la distancia comprendida desde la base del fruto, en la zona de unión con el pedúnculo, hasta el ápice de la mazorca. Este procedimiento permitió establecer la longitud total del fruto utilizado en la investigación.

La medición se efectuó utilizando instrumentos de medición graduados, específicamente una escuadra métrica y una hoja centimetrada, lo que permitió obtener valores precisos del tamaño longitudinal de las mazorcas evaluadas. Este parámetro forma parte de la caracterización física del fruto de cacao, ya que permite describir las dimensiones del material vegetal utilizado en el estudio y relacionarlo con el rendimiento potencial del fruto (Rodríguez et al., 2016).

2.6.1.2.4. Diámetro del fruto de cacao

Para determinar el diámetro del fruto de cacao, se realizó un corte transversal en la parte media de la mazorca, con el fin de obtener la sección central del fruto y facilitar la medición de esta variable.

Posteriormente, se procedió a medir el diámetro de la sección obtenida, utilizando una regla graduada, lo que permitió registrar el valor correspondiente al ancho máximo del fruto en su parte media. Este procedimiento permitió obtener datos representativos sobre las dimensiones físicas de las mazorcas utilizadas en el estudio.

La determinación del diámetro del fruto constituye un parámetro importante dentro de la caracterización morfológica del cacao, ya que permite describir las dimensiones del fruto y relacionarlas con el rendimiento potencial de almendras por mazorca (Ayestas, 2009).

2.6.1.3. Proceso de fermentación

Posteriormente, las almendras frescas de cacao fueron colocadas en cajas micro-fermentadoras elaboradas de madera de guayacán blanco, con una capacidad total de 30 celdas y dimensiones aproximadas de 125 × 75 × 10 cm. Cada celda fue utilizada para alojar 2 kg de masa fresca de almendras de cacao, completando la totalidad de los compartimentos de la micro-fermentadora.

Para la aplicación de los tratamientos experimentales, las almendras se colocaron en fundas de polietileno de baja densidad, con excepción de los tratamientos testigo, los cuales se mantuvieron sin este recubrimiento para evaluar su comportamiento bajo condiciones naturales de fermentación. En total, se trabajó con aproximadamente 60 kg de masa fresca de cacao.

El proceso fermentativo tuvo una duración de cuatro días, periodo correspondiente al manejo experimental aplicado al cacao procedente de las dos unidades productivas evaluadas. Durante esta etapa se registraron variables fisicoquímicas consideradas fundamentales para el seguimiento del proceso fermentativo, entre ellas temperatura, pH y sólidos solubles totales (°Brix), parámetros que permiten monitorear las transformaciones bioquímicas que ocurren en la masa fermentativa del cacao (Rojas et al., 2020).

2.6.1.4. Adición de Microorganismos

La incorporación de los microorganismos eficientes en la masa fresca de cacao se realizó siguiendo el esquema del croquis experimental previamente establecido, en el cual se definieron los tratamientos, las dosis correspondientes y el número de repeticiones para cada unidad experimental.

Los microorganismos fueron aplicados directamente sobre las almendras frescas de cacao, distribuyéndolos de manera uniforme dentro de cada celda de las micro-fermentadoras, con el propósito de favorecer su interacción con la masa fermentativa. La cantidad aplicada en cada tratamiento se ajustó de acuerdo con

las dosis establecidas en el diseño experimental, garantizando la homogeneidad en la aplicación y el cumplimiento de las condiciones del experimento.

Este procedimiento permitió evaluar el efecto de los consorcios microbianos durante la etapa fermentativa, así como su posible influencia en las transformaciones bioquímicas de la masa de cacao y en la reducción del contenido de cadmio presente en las almendras.

2.6.1.4.1. Albiobacth

En el presente estudio se empleó el consorcio microbiano comercial Albiobacth, utilizado como bioinsumo debido a su capacidad de aportar diferentes microorganismos benéficos durante los procesos biológicos asociados a la fermentación.

Este producto contiene una concentración aproximada de bacterias de 1.3×10^7 UFC mL⁻¹ y levaduras de 4.0×10^6 UFC mL⁻¹, lo que permite su aplicación como inductor de actividad microbiológica en la masa fermentativa de cacao. Dentro de su composición microbiológica se encuentran diversas especies con funciones importantes en procesos fermentativos y biotecnológicos, entre ellas *Azotobacter chroococcum*, *Lactobacillus acidophilus*, *Saccharomyces cerevisiae* y *Rhizobium japonicum*, microorganismos que pueden contribuir al desarrollo de transformaciones metabólicas durante la fermentación.

La incorporación de este consorcio microbiano en la masa fresca de cacao busca estimular la actividad microbiana durante la fermentación, favoreciendo las transformaciones bioquímicas del grano y contribuyendo potencialmente a procesos de adsorción o inmovilización de metales pesados, como el cadmio, presentes en las almendras (Vera & Salazar, 2021; Vásquez et al., 2024).

Figura 11
Consorcio microbiano ALBIOBACTI®



BIOFERTILIZANTE E INOCULANTE BIOLÓGICO CON MICROORGANISMOS DEL SUELO

MODO DE ACCIÓN

Se lo aplica dirigido al suelo, en drench o aspersión en aplicaciones terrestres en suelos que sean disminuidos por el trabajo agrícola y contribuyen a que los micro-organismos aseguren la fijación de nitrógeno y a la vez aceleren el proceso de degradación de los materiales orgánicos en nutrientes; en el suelo lo transforman a formas disponibles para su mejor asimilación, estimulan el crecimiento vegetal, incrementan la cantidad de raíces en las plantas, contribuyen a la recuperación de la población microbiana por la utilización intensiva de agroquímicos y fertilizantes sintéticos, la compactación, la falta de aireación y las quemaduras del suelo.

COMPOSICIÓN GARANTIZADA

Azospirillum Brasiliense
 * Azotobacter Chroococcum
 * Lactobacillus acidophilus
 * Saccharomyces Cerevisiae
 * Rhizobium Japonicum
 * Unidades formadoras de colonia UFC.

RECOMENDACIONES

CULTIVOS	DOSIS	APLICACIÓN
Semillas: Maíz, arroz, soya y fréjol	15-20cc Kg de semilla	Aspersión dirigida.
Colinos: Plátano, banano y merlismo (Plantulas), pila	15cc Ltr. de agua	En inmersión sembrar después de 15 minutos
Esquejes de yuca, flores	800cc	Drench en 100 Ltr./Agua.
Esquejes de cacao, caña de azúcar	10cc Ltr./Agua	Inmersión o aspersión.

DISTRIBUIDO Y FORMULADO POR:



REGISTRO MAG, EN TRÁMITE

TELFS.:
 097 556083 - 082 623412
 052 760369 - 052 760971
 Quevedo - Las Rios - Ecuador

USOS DEL ALBIOBACTH

- Se utiliza como inoculantes de semillas, colinos, en la preparación de humos para el proceso de agricultura orgánica y tradicional.
- Vigoriza la germinación y mayor tamaño de plántulas.
- Mayor formación de raíces.
- Toma de resistencia al ataque de patógenos.
- Permite mayor biodegradación de materiales orgánicos y minerales alrededor de las raíces de las plantas.

TRATAMIENTOS EN CULTIVOS ESTABLECIDOS

- Bioactiva el medio biótico y abiótico dándole vida al suelo.
- Permite un mejor aprovechamiento de los abonos edáficos, y una mejor absorción de la planta.
- Mejor balance nutricional para el desarrollo de la planta y permite que toleren el ataque de plagas y enfermedades.
- Se utiliza en aplicaciones combinadas con fungicidas de aspersión foliar (emulsiones) y estos a su vez potencializan la acción del producto y se obtiene un mejor control de enfermedades del follaje.

Nota: ALBIOBACTI® utilizado como inoculante biológico para potenciar la fermentación del cacao y la inmovilización de metales pesados (Autores, 2026).

2.6.1.4.2. Comercial

Se aplico Producto Comercial (Nombre comercial), su contenido es conformado por *Saccharomyces Cerervisiae* 2.4×10^5 de UFC y *Lactobacillus Casei* 1.3×10^7 UFC (EMBIOECSA, 2021).

2.6.1.5. Dosis de aplicación de microorganismos

La dosis de aplicación de los microorganismos se estableció siguiendo la metodología propuesta por Vásquez et al. (2022). Con base en este procedimiento, se determinó la cantidad de bioinsumo a utilizar para los tratamientos correspondientes a Albiobacth y COMERCIAL.

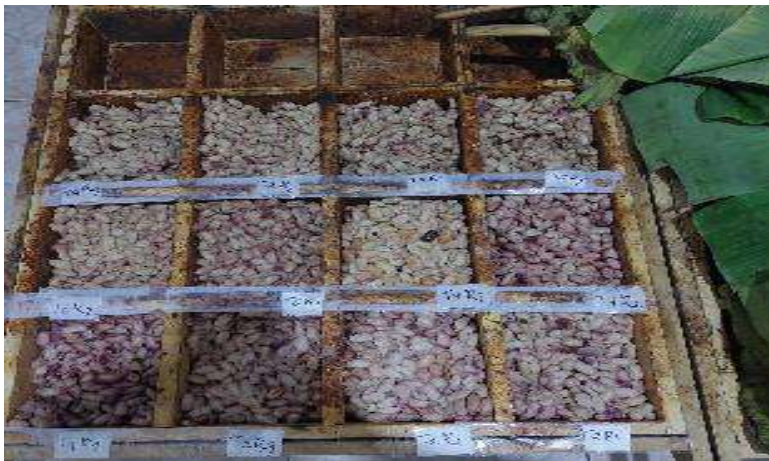
Para cada unidad experimental se aplicó una concentración del 20 % del producto líquido, equivalente a 400 mL de microorganismos, los cuales fueron incorporados directamente a la masa fresca de almendras de cacao durante la etapa fermentativa.

La aplicación de esta dosis permitió garantizar una adecuada presencia de microorganismos en la masa fermentativa, favoreciendo la actividad microbiológica del sistema y permitiendo evaluar su efecto sobre las variables

analizadas en la investigación, particularmente en relación con la calidad del cacao y la posible reducción del contenido de cadmio en las almendras.

Figura 12

Distribución de tratamientos en la masa fermentativa



Nota: (Autores, 2026).

2.6.1.6. Adición de Extracto de frutas (Banano y Manzana)**2.6.1.6.1. Preparación de Extracto de frutas Banano**

Para el desarrollo del experimento se utilizó extracto de fruta de banano como fuente natural de enzimas polifenol oxidasa (PPO), las cuales participan en reacciones de oxidación de compuestos fenólicos y en procesos de pardeamiento enzimático asociados a la fermentación del cacao. Estas enzimas pueden contribuir a modificaciones bioquímicas dentro de la almendra, favoreciendo el desarrollo de compuestos precursores de aroma y sabor durante la fermentación.

El extracto fue preparado a partir de bananos en estado de madurez fisiológica completa (coloración amarilla), seleccionados siguiendo los criterios de maduración descritos en estudios previos sobre actividad enzimática en frutas. Se aplicó una concentración del 3 % equivalente a 60 mL por unidad experimental, con el objetivo de evaluar su posible efecto en el mejoramiento de la calidad del grano y en la reducción del contenido de cadmio (Cd^{2+}) durante la fermentación del cacao.

Para la obtención del extracto se realizó un proceso de homogenización de la pulpa de banano, empleando aproximadamente cuatro frutos con un peso

promedio de 150 g cada uno. La pulpa fue sometida a un proceso de licuado, añadiendo 200 mL de agua destilada a una temperatura inferior a 40 °C, con el fin de evitar la desnaturalización de las enzimas presentes en el extracto (Guevara & Morales, 2017).

La determinación de la actividad enzimática de la polifenol oxidasa se realizó considerando el método propuesto por Montgomery y Sgarbieri, basado en la medición espectrofotométrica de la formación de compuestos coloreados derivados del pardeamiento enzimático. Para ello, se registró la absorbancia mediante un espectrofotómetro UV-visible a una longitud de onda de 420 nm, realizando lecturas durante 10 minutos a intervalos de 30 segundos, procedimiento comúnmente utilizado para evaluar la actividad de esta enzima en frutas como el banano.

La polifenol oxidasa es una enzima ampliamente distribuida en tejidos vegetales y participa en reacciones de oxidación de compuestos fenólicos, generando quinonas que posteriormente se polimerizan formando pigmentos oscuros responsables del pardeamiento enzimático. Este proceso puede contribuir a cambios importantes en la composición fenólica del cacao durante la fermentación, favoreciendo transformaciones que influyen en el perfil sensorial del grano (Badui, 2006).

2.6.1.6.2. Preparación de Extracto de frutas manzana

Para la obtención del extracto de manzana como fuente natural de la enzima polifenol oxidasa (PPO), se emplearon frutos en estado de madurez comercial, con el propósito de evaluar su posible efecto en el mejoramiento de la calidad del grano de cacao y en la disminución del contenido de cadmio (Cd^{2+}) durante la etapa fermentativa.

El extracto fue preparado utilizando una concentración del 3 % equivalente a 60 mL por unidad experimental. Para su elaboración se seleccionaron aproximadamente seis frutos de manzana, con un peso promedio entre 100 y 150 g por fruto. Posteriormente, la pulpa fue sometida a un proceso de homogenización mediante licuado, adicionando 200 mL de agua destilada a una temperatura inferior a 40 °C, con el fin de evitar la desnaturalización de las

enzimas presentes en el extracto (Jiménez & Zambrano, 2011; Morante et al., 2014).

La actividad de la enzima polifenol oxidasa presente en el extracto de manzana fue considerada con base en metodologías utilizadas en estudios previos sobre pardeamiento enzimático en frutas. De acuerdo con el procedimiento descrito por Piedra (2017), la actividad de esta enzima puede evaluarse mediante la medición de la absorbancia a una longitud de onda de 420 nm por minuto, utilizando espectrofotometría UV-visible. Este método permite estimar la velocidad de oxidación de compuestos fenólicos catalizada por la polifenol oxidasa.

La incorporación de extractos frutales ricos en enzimas oxidativas dentro de la masa fermentativa del cacao puede favorecer transformaciones bioquímicas relacionadas con la oxidación de compuestos fenólicos y el desarrollo de pigmentos asociados al pardeamiento del grano, procesos que influyen en la formación de precursores aromáticos y en la calidad sensorial del cacao fermentado. Asimismo, estos procesos bioquímicos podrían contribuir indirectamente a la interacción o inmovilización de metales pesados presentes en la matriz del grano durante la fermentación.

2.6.1.7. Determinación de pH

La determinación del pH de las almendras de cacao se realizó con el fin de monitorear los cambios químicos que ocurren durante el proceso fermentativo. Para ello, se tomó una muestra de 10 g de habas de cacao, las cuales fueron previamente trituradas hasta obtener una mezcla homogénea.

Posteriormente, la muestra fue diluida en 10 mL de agua destilada previamente templada a una temperatura aproximada de 40 °C, con el propósito de facilitar la solubilización de los compuestos presentes en la muestra. La mezcla se colocó en un vaso de vidrio limpio, donde se procedió a realizar la medición correspondiente.

El pH fue determinado utilizando un pH-metro previamente calibrado, registrando los valores obtenidos para cada uno de los tratamientos experimentales y sus respectivas repeticiones. Este procedimiento se realizó diariamente durante los

cuatro días del proceso fermentativo, permitiendo así evaluar la evolución del pH dentro de la masa fermentativa de cacao (Erazo et al., 2021).

2.6.1.8. Determinación de °Brix

Para la medición de esta variable se necesita un Brixometro, se procedió a tomar 10 gramos de almendras de cacao al azar posteriormente se macerarán en 10 mL de agua destilada tibia, se debe colocar de 1 - 3 gotas de la solución obtenida, el equipo con marca OPTi+ antes de la aplicación de las gotas de la muestra se calibra dejándolo en 0.00, para asegurar la toma correcta de la muestra de los diferentes tratamientos y sus repeticiones (Abreu *et al.*, 2017).

2.6.1.9. Determinación de Temperatura

La toma de temperatura es vital para que exista una actividad fermentativa adecuada lo cual se controló que la temperatura no sea mayor a 50°C ni estar por debajo del valor de 45° C ya que a mayor temperatura existirá una sobre fermentación y quema de los granos de cacao y si es muy inferior no va existir que haya una calidad optima del grano ni una excelente etapa fermentativa, su medición se requiere de un termómetro para la toma de esta variable (Morales *et al.*, 2012).

2.6.1.10. Secado de las almendras de cacao

Ya culminado el proceso de fermentación esta etapa importante para la calidad del grano donde existe el desarrollo de precursores de aroma y sabores y calidades sensoriales, se realizará el secado de las almendras de cacao de tal forma debe ser a luz directa del sol de tal modo de forma cuidadosa sin que exista una mezcla de los granos de cacao ya que están sometidos a varias adiciones y tipos de fincas (Bertorelli *et al.*, 2014).

El secado del cacao se efectuó en superficies de madera la cual fue adecuado para esta práctica; no debe colocarse sobre cualquier superficie debido a la contaminación de agentes externos, las almendras de cacao deben tener remociones adecuadas y constante para que exista un secado homogéneo que normalmente oscila en un periodo de días de 7-8 días al sol, con la finalidad que

tengan un porcentaje adecuado de humedad siendo estos de 6 a 8% (Vallejo et al., 2018).

2.6.1.11. Almacenamiento de las almendras de cacao

Terminado la etapa de secado se procedió a guardar las almendras de cacao según que se alteren sus tratamientos y repeticiones estas se colocaron en bolsas de papel, esto ayudará al mejoramiento de la calidad de las habas de cacao (Ortíz & Guilcapi, 2020) (Saza & Jiménez, 2020).

2.6.1.12. Índice de mazorca

Esta variable indica el número de frutos de cacao requeridos (20 mazorcas) que se necesita para obtener 1 Kg de cacao seco según la ecuación: (Vera et al., 2015).

Ecuación. Índice de semilla:

$$IM = \frac{\text{Numero de mazorcas}}{\text{peso en gramos de las almendras secas}} * 1000$$

2.6.1.13. Índice de semilla

Para la toma de esta variable de índice de semilla debe realizarse con la toma de 100 almendras de cacao estas deben estar fermentadas y secas además pesadas en una balanza analítica y deben ser promediadas los datos, esto se realiza antes de la prueba de corte para determinar esta variable se realizará con la siguiente formula (Quintana et al., 2015).

Ecuación. Índice de semilla:

$$IS = \frac{\text{Peso en gramos de 100 almendras de cacao fermentadas y secas}}{100}$$

2.6.1.14. Prueba de testa y cotiledón

Se obtuvo por medio del peso las cuales se pesaron en una balanza analítica de precisión con una cantidad de cacao que es considerable de 30 gramos de cacao deben ser fermentadas y secas se utilizó la presente formula (Vallejo et al., 2015) (Batallas et al., 2021).

Prueba de testa y cotiledón:

$$\% \text{ de testa} = \frac{(\text{Peso de la testa})}{\text{Peso de 30 gramos de cacao}} * 100$$

2.6.1.15. Prueba de corte

Este valor se obtuvo al seleccionar al azar 100 almendras de cacao, se pesó en una balanza analítica de precisión además con ayuda de un estilete se realizó un corte transversal en las habas secas para poder evaluar por medio de un test observatorio y verificar si existió una excelente fermentación o algún efecto de estas, clasificando, Bien fermentadas, Medianamente Fermentadas, Violetas, Pizarras y Mohosas, utilizando las normativas y lineamientos de clasificación de las normativa INEN 176/2018 (INEN, 2018) (Vallejo et al., 2015) (Batista, 2018)..

2.6.1.16. Peso de habas de cacao en 100 gramos

En este apartado se realizó aleatoriamente tomadas al azar 100 gramos que posterior se tomó apuntes del número de almendras para completar los 100 gramos (Vallejo et al., 2015).

2.6.1.17. Humedad

Al momento de tener las almendras secas y fermentadas se procede a medir esta variable de humedad que es de punto clave para el almacenamiento debe ser un máximo de 7% de humedad y un mínimo de 6% por motivo comercial no rentable para la industria cacaotera al ser inferior a estos porcentajes mencionados afectando su precio y sus características para procesar y tener un chocolate de baja calidad, el instrumento que se utilizó para medir la humedad interna del grano fue el AQUA BOY III, por ser adecuado específicamente para granos y de prioridad de cacao, se coloca la muestra de las habas de cacao en el sensor y se procede a dar lectura según el manual del equipo y su modelo (INEN, 1986).

Tabla 7

Procedimiento para el análisis de humedad en granos de cacao

Paso	Evidencia fotográfica	Descripción argumentada
Paso 1		Colocación de la muestra. En esta fase los granos de cacao se depositan en el compartimento de lectura, procurando una distribución homogénea. Este paso es esencial porque una muestra mal acomodada puede generar sesgos en la medición, mientras que una disposición uniforme favorece una estimación más representativa del contenido real de humedad.
Paso 2		Cierre del detector. El sellado del dispositivo permite aislar la muestra del ambiente inmediato y reducir interferencias externas durante el análisis. Desde el punto de vista metodológico, esta acción contribuye a mejorar la estabilidad de la lectura y a conservar condiciones controladas para una medición más confiable y reproducible.
Paso 3		Ingreso del detector en el equipo. Una vez cerrada la cámara, el detector se introduce en el medidor para activar el proceso instrumental. Esta etapa garantiza que el equipo procese la señal bajo el protocolo previsto, permitiendo que el sistema convierta la respuesta física de la muestra en una lectura cuantificable de humedad.
Paso 4		Toma de la lectura de humedad. Finalmente, se observa y registra el valor indicado por el equipo. Este dato constituye el resultado analítico del procedimiento y es determinante para evaluar la condición del cacao, ya sea para fines de control de calidad, manejo poscosecha, fermentación o almacenamiento.

Nota: La secuencia presentada permite documentar de forma visual y técnica el procedimiento empleado para la determinación de humedad en las almendras de cacao (Autores, 2026).

2.6.1.18. Muestreo método cuartil.

Dicho método se realizó para clasificar de manera al azar almendras de cacao dividiéndolas en 4 cuadrantes homogéneos y clasificarlos con letras o números

ejemplo (1,2,3,4), secundado a este paso se procedió a descartar extremos aleatorio al azar hasta alcanzar una muestra compacta por cada tratamiento y repetición al menos dos veces el mismo proceso hasta tener aproximadamente 100 gramos de almendras secas fermentadas de cacao, este mismo método es recomendable su utilización para la prueba de muestreo según la normativa INEN 175 previo a la prueba de corte (INEN, 1986), de igual manera se utilizó para el análisis de cadmio ver la imagen en Anexos, Método de muestreo por cuartil en la determinación físicas de las almendras “Clasificación por el método de cuarteo”(Contreras & Pérez, 2017).

2.6.1.19. Determinación de Cadmio

La determinación del contenido de cadmio (Cd^{2+}) en las muestras de cacao se realizó mediante la técnica de espectrometría de absorción atómica con horno de grafito (GF-AAS), método ampliamente reconocido por su alta sensibilidad y precisión en la cuantificación de metales pesados en matrices alimentarias. Este procedimiento permite detectar concentraciones muy bajas del metal, con límites de detección comprendidos aproximadamente entre 0,002 y 0,02 $\mu\text{g L}^{-1}$, lo que lo convierte en una herramienta confiable para estudios de contaminación en productos agrícolas.

Este método analítico ha sido validado y recomendado por organismos internacionales como el Codex Alimentarius y la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA), debido a su capacidad para proporcionar resultados exactos en la determinación de metales traza presentes en alimentos. Diversos estudios, como los reportados por Pastás et al. (2021) y Carrillo et al. (2013), destacan la confiabilidad de esta técnica para evaluar la presencia de cadmio en granos de cacao y otros productos derivados.

Para el análisis, se utilizó 1 g de muestra de cacao seco previamente fermentado, el cual fue sometido a un proceso de homogeneización y trituración con el fin de garantizar la uniformidad del material analizado. Posteriormente, la muestra fue sometida a un proceso de digestión húmeda, utilizando ácido nítrico (HNO_3) como agente oxidante principal. Este procedimiento se llevó a cabo mediante un sistema de digestión asistido por microondas, el cual permitió alcanzar una

temperatura aproximada de 150 °C, favoreciendo la completa descomposición de la materia orgánica presente en la muestra.

Durante la digestión se adicionaron 7 mL de ácido nítrico (HNO_3) y 3 mL de peróxido de hidrógeno (H_2O_2), reactivos que facilitan la mineralización de la muestra y la liberación de los metales presentes en la matriz. Una vez finalizado el proceso de digestión, el extracto obtenido fue filtrado cuidadosamente para eliminar residuos sólidos, utilizando jeringas y filtros apropiados antes de realizar la lectura instrumental.

En caso de ser necesario, se realizaron diluciones adicionales del digestato, con el objetivo de ajustar la concentración de la muestra dentro del rango óptimo de detección del equipo analítico. Finalmente, la cuantificación del cadmio se llevó a cabo mediante un espectrofotómetro de absorción atómica equipado con horno de grafito, siguiendo los lineamientos establecidos en la norma del método 3050B del USDAP, ampliamente utilizado para el análisis de metales pesados en matrices ambientales y alimentarias (Santander et al., 2021; Rodríguez et al., 2022).

Los resultados obtenidos fueron registrados y procesados en las hojas de control correspondientes para su posterior análisis estadístico. La Figura 7 muestra de manera esquemática el procedimiento utilizado para la determinación del cadmio en las almendras de cacao.

Figura 13

Método de Cadmio se realizó con 3050B de USDAP



Nota: (Autores, 2026).

The background features a light blue and white geometric pattern of overlapping squares and rectangles. In the bottom right corner, there is a faint, light gray network diagram consisting of interconnected circles and lines, resembling a molecular or organizational structure.

CAPITULO 3

RESULTADOS

Resultados

3.1. Variables físicos-químicas

3.1.1. Variables iniciales de la mazorca

El análisis de varianza (ANOVA) realizado para las variables físicas de la mazorca permitió identificar el comportamiento de los factores evaluados dentro del experimento. En la Tabla 4 se observa que el factor Provincia no presentó diferencias estadísticas significativas para las variables físicas analizadas de la mazorca de cacao, de acuerdo con la prueba de comparación múltiple de Tukey al nivel de significancia de $p \leq 0.05$. Este resultado indica que, a pesar de que las muestras provinieron de dos zonas productoras distintas, las características físicas de los frutos evaluados presentaron un comportamiento relativamente homogéneo entre los sitios de estudio.

En relación con el factor extracto de fruta, el análisis estadístico evidenció que las variables índice de mazorca, longitud del fruto (largo del lomo), ancho del fruto y peso de almendras no mostraron diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos evaluados. Sin embargo, para las variables peso de mazorca, peso de cáscara y número de almendras por fruto, el ANOVA indicó la presencia de diferencias estadísticas significativas, las cuales fueron confirmadas mediante la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Este comportamiento sugiere que la aplicación de extractos frutales podría estar relacionada con variaciones en ciertos componentes estructurales del fruto, particularmente en aquellos asociados al rendimiento físico del cacao.

Al analizar la interacción entre los factores Provincia y Extracto de fruta, se observó la presencia de diferencias significativas únicamente en la variable número de almendras, mientras que para el resto de las variables físicas evaluadas no se registraron diferencias estadísticas concluyentes entre los tratamientos. Esto evidencia que el número de semillas por fruto puede presentar cierta sensibilidad a la interacción de factores ambientales y tratamientos aplicados durante el estudio.

En cuanto a la interacción entre Provincia y Microorganismos eficientes, los resultados estadísticos mostraron diferencias significativas en las variables peso de cáscara y número de almendras, indicando que la combinación entre el origen del material vegetal y la aplicación de microorganismos puede influir en determinados componentes físicos del fruto. No obstante, para las demás variables analizadas no se detectaron diferencias estadísticas significativas en la prueba de comparación múltiple de Tukey ($p \leq 0.05$).

Por otro lado, la interacción entre Extracto de fruta y Microorganismos eficientes no evidenció efectos estadísticamente significativos sobre las variables físicas evaluadas. Este resultado sugiere que, bajo las condiciones experimentales del estudio, la combinación de estos factores no generó variaciones relevantes en las características morfológicas del fruto de cacao.

Asimismo, al evaluar la interacción trifactorial entre Provincia, Extracto de fruta y Microorganismos eficientes, no se registraron diferencias significativas en las variables físicas estudiadas, lo que indica que la combinación simultánea de estos factores no produjo efectos diferenciados sobre las características físicas de la mazorca.

En el caso de la comparación entre los tratamientos testigo (Testigo 1 correspondiente a Manabí y Testigo 2 correspondiente a Esmeraldas) frente al resto de tratamientos, se observaron diferencias estadísticas significativas en las variables peso de mazorca, peso de cáscara y peso de almendra, lo cual sugiere que los tratamientos aplicados pudieron generar variaciones en estas variables en comparación con los sistemas sin aplicación. Para las demás variables analizadas no se registraron diferencias estadísticas significativas según el test de Tukey ($p \leq 0.05$).

De igual forma, el análisis de varianza permitió comparar directamente los dos tratamientos testigo (Manabí vs. Esmeraldas), encontrándose que no existieron diferencias estadísticas significativas entre ambos, lo cual indica que las características físicas iniciales del material vegetal proveniente de ambas zonas fueron comparables dentro del diseño experimental.

Diversos estudios coinciden en señalar que los parámetros físicos iniciales del fruto de cacao constituyen indicadores importantes de la calidad potencial del

grano, ya que variables como peso de mazorca, número de almendras y dimensiones del fruto pueden influir en el rendimiento industrial del cacao. En este sentido, Sánchez et al. (2014) señalan que el peso de la mazorca puede variar en función de factores como la variedad de cacao, condiciones edafoclimáticas, disponibilidad de nutrientes y manejo agronómico del cultivo. Los autores reportaron que se requieren entre 14 y 21 mazorcas para obtener aproximadamente 1 kg de cacao fermentado y seco, valores que resultan superiores a los observados en el presente estudio.

Por su parte, Quintana et al. (2015) indican que el índice de mazorca generalmente se encuentra en un rango de 13 a 20 frutos para producir 1 kg de cacao seco, valores que presentan similitud con los obtenidos en la presente investigación, lo que sugiere que el material vegetal evaluado se encuentra dentro de los parámetros productivos reportados para el cultivo.

De acuerdo con Lagunes et al. (2018), el peso de las mazorcas de cacao en sistemas de producción convencional suele oscilar entre 700 y 1000 g por fruto, valores que coinciden con los rangos obtenidos en el presente estudio. Este comportamiento sugiere que las condiciones productivas de las fincas evaluadas presentan características comparables con otros sistemas cacaoteros reportados en la literatura científica.

Asimismo, Ortiz y Álvarez (2015) reportaron que las mazorcas de cacao presentan variaciones morfológicas importantes dependiendo de su tamaño. Los autores clasifican las mazorcas grandes con longitudes entre 20 y 25 cm, las mazorcas medianas entre 15 y 19 cm, mientras que las de menor tamaño presentan dimensiones cercanas a 14 cm de diámetro. Estos rangos coinciden con los valores reportados por Vallejo et al. (2011), quienes señalan que los frutos de cacao pueden presentar longitudes entre 19 y 26 cm, resultados que muestran concordancia con los datos obtenidos en el presente estudio.

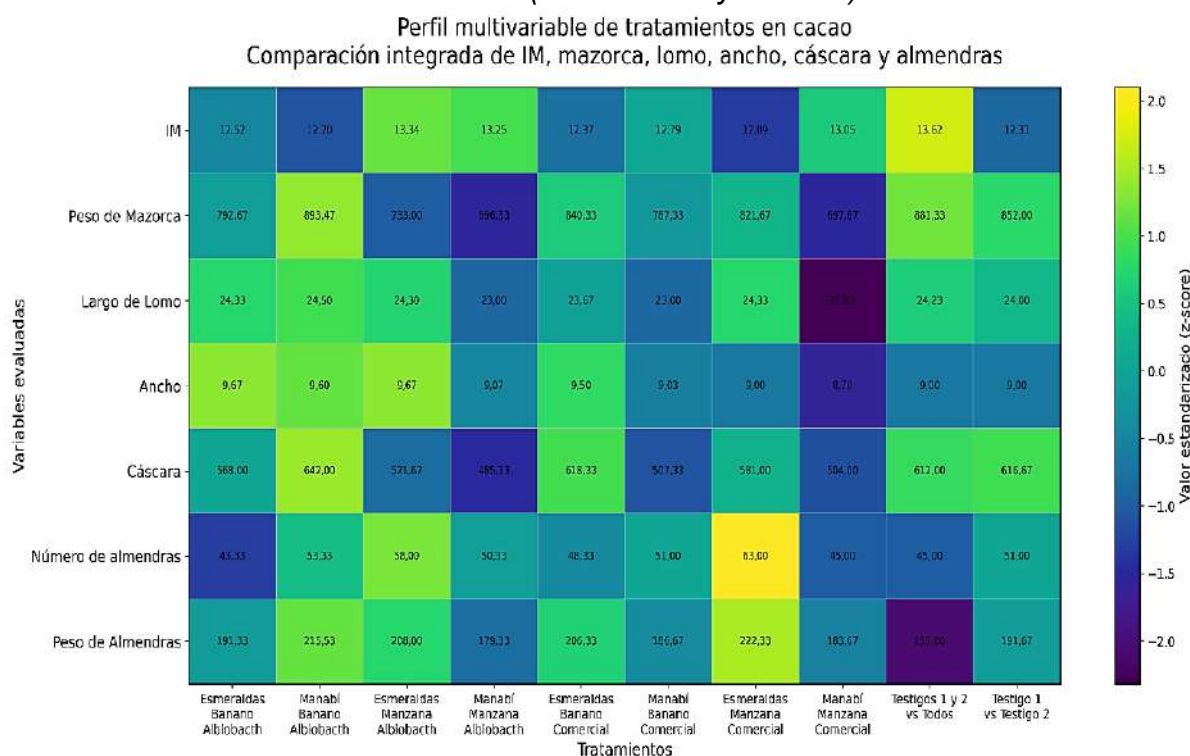
Por otro lado, Graziani et al. (2012) reportaron diferencias en variables físicas del fruto al comparar distintas variedades de cacao, específicamente Criollo, Forastero y Trinitario, encontrando variaciones en parámetros como ancho del fruto, peso de cáscara, número de almendras y peso de almendras. Los valores registrados por estos autores fueron inferiores a los obtenidos en esta

investigación; sin embargo, los resultados más cercanos corresponden a la variedad Trinitario.

Finalmente, estudios realizados por Sandoval y Horta (2021) resaltan la importancia de realizar una caracterización física inicial de las mazorcas y almendras de cacao, ya que estas variables permiten estimar la calidad potencial del grano antes de los procesos de fermentación y secado. El conocimiento de estas características constituye una herramienta fundamental para comprender el comportamiento del cacao durante la poscosecha y para establecer estrategias que permitan mejorar la calidad del producto final.

Figura 14

Efecto de la interacción de Provincia (Esmeraldas y Manabí) A



Nota: En base a la aplicación de Extracto de frutas (banano y manzana), y la aplicación de dos Microorganismos sobre las variables físicas iniciales de la mazorca de cacao (Autores, 2026).

3.2. pH

En relación con la variable pH durante el proceso fermentativo (Tabla 5), el análisis de varianza evidenció que el factor Provincia generó diferencias estadísticas significativas en la mayoría de los momentos evaluados del proceso, específicamente en pH₀, pH₁, pH₂ (altamente significativo) y pH₃, según la

prueba de comparación múltiple de Tukey con un nivel de significancia de $p \leq 0.05$. Sin embargo, en el día final de evaluación (pH_4) no se registraron diferencias estadísticas entre las provincias analizadas.

En el estado inicial de fermentación (pH_0) se observó una variabilidad entre las zonas productoras evaluadas. Las muestras provenientes de Manabí presentaron un pH promedio de 3.23, valor ligeramente superior al registrado en las almendras procedentes de Esmeraldas, donde se obtuvo un promedio de 3.16. Estos resultados evidencian que las condiciones edafoclimáticas y el origen geográfico del material vegetal pueden influir en el comportamiento inicial del pH en las almendras frescas de cacao.

En cuanto al factor Extracto de fruta, el análisis estadístico indicó que no se presentaron diferencias significativas entre tratamientos en la mayoría de los momentos evaluados (pH_0 , pH_1 , pH_2 y pH_4). No obstante, durante el tercer día de fermentación (pH_3) se identificó una diferencia significativa, destacándose la aplicación del extracto de manzana, que alcanzó un valor promedio de pH 5.37, lo que sugiere una posible influencia de este extracto en las transformaciones bioquímicas de la masa fermentativa.

Por otra parte, el análisis correspondiente al factor Microorganismos eficientes mostró diferencias estadísticas significativas en los días pH_3 y pH_4 , de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). En contraste, en los primeros días del proceso fermentativo no se observaron diferencias relevantes entre tratamientos. Dentro de este factor, el consorcio microbiano COMERCIAL evidenció un comportamiento más favorable en la regulación del pH durante la fermentación, sugiriendo un efecto positivo sobre el acondicionamiento químico del grano.

Al evaluar la interacción entre Provincia y Microorganismos eficientes, se observó que los valores correspondientes a pH_0 y pH_3 no presentaron diferencias significativas. Sin embargo, para los días pH_1 , pH_2 y pH_4 se detectaron diferencias estadísticas importantes según el test de Tukey ($p \leq 0.05$). En este contexto, se observó que la aplicación del microorganismo Comercial mostró un efecto más eficiente en las muestras provenientes de la provincia de Manabí. Por ejemplo, en el día pH_1 , el tratamiento correspondiente a Manabí con *Albiobacth* alcanzó un valor de 3.82, mientras que en pH_2 , el tratamiento aplicado en

Esmeraldas con COMERCIAL registró un valor de 4.30. Finalmente, para Manabí con aplicación de COMERCIAL, el valor observado alcanzó 5.69, indicando un incremento progresivo del pH durante el proceso fermentativo.

En cuanto a la interacción entre Extracto de fruta y Microorganismos eficientes, se evidenció una diferencia significativa únicamente en el tercer día de fermentación (pH_3). En esta interacción, el tratamiento que combinó extracto de manzana con el microorganismo Albiobacth alcanzó un valor promedio de 5.37, mostrando un comportamiento distinto respecto a los demás tratamientos evaluados.

Asimismo, al analizar la interacción triple entre Provincia, Extracto de fruta y Microorganismos eficientes, se identificaron diferencias estadísticas en los momentos pH_1 y pH_3 . En el caso de pH_1 , el tratamiento correspondiente a Manabí con extracto de manzana y aplicación de Albiobacth registró un valor promedio de 3.82. Por otro lado, en el día pH_3 , el tratamiento correspondiente a Esmeraldas con extracto de manzana y Albiobacth alcanzó un valor aproximado de 5.37, evidenciando la influencia de la interacción entre estos factores en la evolución del pH durante la fermentación.

En lo referente a la comparación entre los tratamientos testigo (sin aplicación) y los tratamientos con aplicación, se identificaron diferencias estadísticas significativas en pH_1 , pH_2 , pH_3 y pH_4 según la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Durante el último día de evaluación, los tratamientos testigo presentaron el valor mínimo de pH (4.66) en comparación con los tratamientos que recibieron aplicaciones experimentales. En contraste, el pH inicial (pH_0) no mostró diferencias estadísticas entre los tratamientos.

Al comparar directamente los dos tratamientos testigo (Manabí vs. Esmeraldas), se evidenciaron diferencias significativas únicamente en los primeros dos momentos del proceso fermentativo (pH_0 y pH_1), lo que sugiere un comportamiento inicial distinto entre las zonas productoras. Para los días posteriores (pH_2 , pH_3 y pH_4) no se registraron diferencias significativas, aunque se observó una tendencia creciente y relativamente lineal del pH conforme avanzó el proceso de fermentación.

Los resultados obtenidos en esta investigación coinciden con diversos estudios reportados en la literatura científica. Erazo et al. (2021) señalan que durante la fermentación del cacao el pH tiende a incrementarse progresivamente, alcanzando valores óptimos entre 5.5 y 5.8, rangos que se consideran adecuados para favorecer el desarrollo de compuestos precursores del aroma y sabor del chocolate.

De manera similar, Ruíz et al. (2014) reportan que, dependiendo de la época de cosecha y de las condiciones de fermentación del cacao nacional, los valores de pH pueden situarse entre 5.10 y 6.00, valores que se consideran apropiados para el desarrollo de la calidad sensorial del grano.

Asimismo, Krähmer et al. (2015) observaron que durante la fermentación del cacao el pH presenta una tendencia creciente que oscila entre 5.0 y 6.0, comportamiento asociado a las transformaciones metabólicas generadas por los microorganismos presentes en la masa fermentativa. En concordancia con estos resultados, Noor y Nazamid (2012) indican que los valores de pH entre 5.20 y 5.49 se relacionan con un perfil sensorial más favorable en el chocolate, caracterizado por mayor intensidad de sabor a cacao. En contraste, valores de pH más bajos (4.5 – 5.0) pueden generar características organolépticas menos deseables.

Por otro lado, Priambodo et al. (2022) señalan que las variaciones del pH durante la fermentación también están relacionadas con el contenido de humedad de los granos, indicando que almendras con mayor humedad pueden presentar valores de pH entre 3.8 y 5.5. De acuerdo con estos autores, el proceso de secado contribuye posteriormente a estabilizar el pH del grano.

De manera similar, Valenzuela et al. (2020) analizaron el efecto del crecimiento microbiano durante la fermentación del cacao y reportaron valores de pH entre 5.02 y 5.49, asociados al desarrollo de levaduras y enzimas durante la fase fermentativa.

Otros autores, como Núñez et al. (2019), indican que los valores iniciales de pH en el proceso fermentativo suelen encontrarse entre 3.30 y 4.00, condiciones que favorecen el desarrollo de levaduras, las cuales predominan durante las

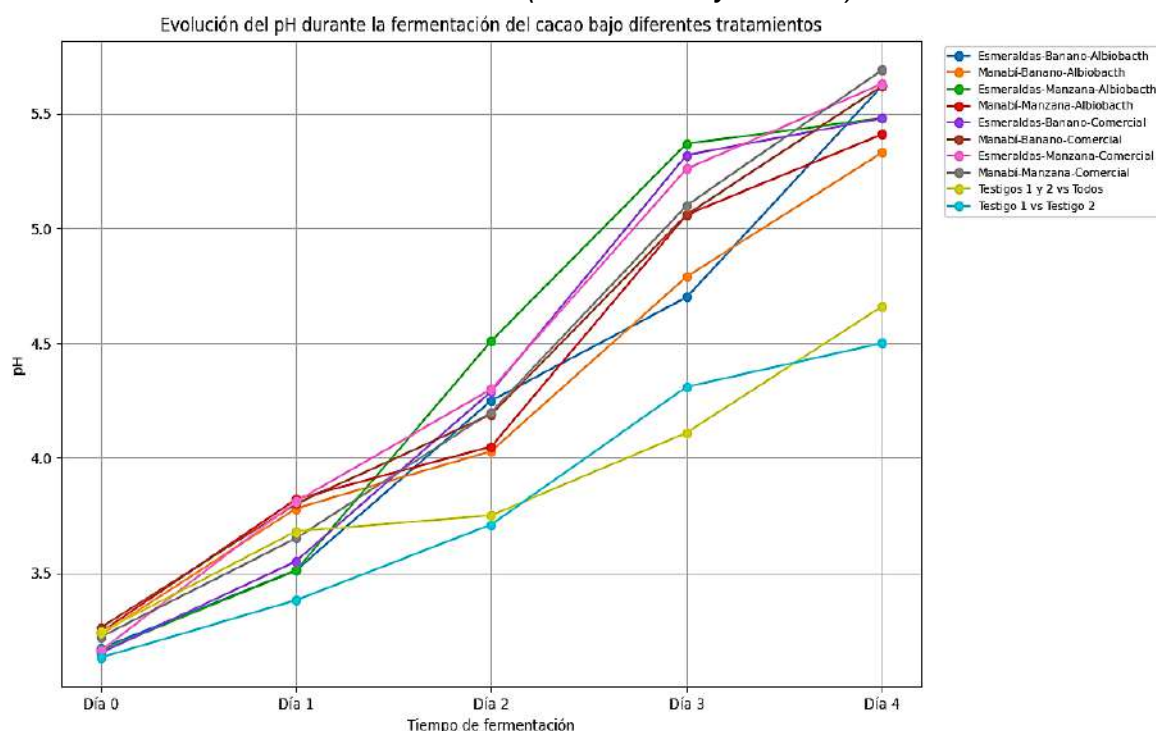
primeras etapas de la fermentación debido a la alta concentración de azúcares, baja disponibilidad de oxígeno y condiciones ácidas del medio.

Finalmente, Afoakwa et al. (2015) reportan que, bajo condiciones adecuadas de fermentación, el pH puede alcanzar valores entre 5.59 y 6.00, rangos que coinciden con los obtenidos en la presente investigación.

En estudios recientes, Alvarado et al. (2022) demostraron que la aplicación de microorganismos eficientes durante la fermentación del cacao puede favorecer el incremento del pH, registrando valores que evolucionan desde 3.49 hasta 5.44, lo que contribuye a mejorar las características aromáticas del cacao. De igual forma, Morejón et al. (2022) reportaron que el uso de levaduras y enzimas en la fermentación permitió alcanzar valores de pH cercanos a 5.26, condición que favorece el desarrollo de compuestos responsables del aroma y sabor característicos del chocolate.

Figura 15

Efecto de la interacción de Provincia (Esmeraldas y Manabí) B



Nota: en base a la aplicación de Extracto (banano y manzana), y la aplicación de dos Microorganismos sobre las variables pH en el periodo fermentativo (Autores, 2026).

3.3. Gados Brix

Los resultados correspondientes a la variable sólidos solubles totales ($^{\circ}\text{Brix}$) durante el proceso fermentativo se presentan en la Tabla 6. El análisis estadístico evidenció que el factor Provincia (Esmeraldas y Manabí) influyó en el comportamiento de esta variable a lo largo del proceso de fermentación. En particular, se observó una tendencia decreciente de los valores de $^{\circ}\text{Brix}$ en la provincia de Manabí durante los últimos días del proceso fermentativo, específicamente en los momentos $^{\circ}\text{Brix}_3$ y $^{\circ}\text{Brix}_4$, donde se registraron valores de 6.70 y 5.48, respectivamente. En los primeros días de evaluación ($^{\circ}\text{Brix}_0$, $^{\circ}\text{Brix}_1$ y $^{\circ}\text{Brix}_2$), los resultados mostraron una disminución progresiva y relativamente lineal, lo cual es característico del consumo de azúcares durante la actividad microbiana en la fermentación del cacao.

En relación con el factor Extracto de fruta, se observó que la aplicación del extracto de banano mostró un descenso favorable en la concentración de sólidos solubles, registrándose un valor de 5.48 $^{\circ}\text{Brix}$ hacia el final del proceso fermentativo. Sin embargo, durante los primeros días evaluados ($^{\circ}\text{Brix}_0$, $^{\circ}\text{Brix}_1$, $^{\circ}\text{Brix}_2$ y $^{\circ}\text{Brix}_3$), tanto el extracto de banano como el de manzana presentaron comportamientos decrecientes similares, sin evidenciar diferencias estadísticas concluyentes entre los tratamientos.

Por otra parte, el análisis correspondiente al factor Microorganismos eficientes evidenció diferencias estadísticas significativas según la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). En el primer día de fermentación ($^{\circ}\text{Brix}_1$) se registró el valor más alto (10.77 $^{\circ}\text{Brix}$) asociado al tratamiento con COMERCIAL. Posteriormente, en el tercer día de fermentación ($^{\circ}\text{Brix}_3$) se observó un valor de 6.60 $^{\circ}\text{Brix}$, también relacionado con la aplicación de este consorcio microbiano. Finalmente, al concluir el proceso fermentativo ($^{\circ}\text{Brix}_4$) el valor disminuyó hasta 5.48 $^{\circ}\text{Brix}$, lo cual confirma la acción metabólica de los microorganismos eficientes en la transformación de azúcares durante la fermentación del cacao.

En cuanto a la interacción entre Provincia y Extracto de fruta, el análisis estadístico mostró diferencias significativas únicamente en el cuarto día de fermentación ($^{\circ}\text{Brix}_4$), donde se registró un valor de 5.48 $^{\circ}\text{Brix}$. En este caso, la provincia de Manabí mostró una mayor respuesta en combinación con el

tratamiento microbiano Comercial, lo que sugiere una interacción favorable entre las condiciones del origen del cacao y la actividad microbiológica. En contraste, durante los primeros días del proceso ($^{\circ}\text{Brix}_0$, $^{\circ}\text{Brix}_1$, $^{\circ}\text{Brix}_2$ y $^{\circ}\text{Brix}_3$) los valores obtenidos se mantuvieron relativamente homogéneos entre los tratamientos.

En relación con la interacción triple entre Provincia, Extracto de fruta y Microorganismos eficientes, el análisis estadístico no evidenció diferencias significativas entre los tratamientos evaluados, de acuerdo con el test de Tukey ($p \leq 0.05$), lo que indica que la combinación simultánea de estos factores no generó cambios estadísticamente relevantes en la concentración de sólidos solubles durante la fermentación.

Al comparar los tratamientos testigo (sin aplicación) con los tratamientos experimentales, se observó que en el estado inicial de fermentación ($^{\circ}\text{Brix}_0$) no existieron diferencias estadísticas entre las muestras, lo cual era esperable debido a que todas las unidades experimentales presentaban condiciones iniciales similares. Sin embargo, a partir de los días posteriores ($^{\circ}\text{Brix}_1$, $^{\circ}\text{Brix}_2$, $^{\circ}\text{Brix}_3$ y $^{\circ}\text{Brix}_4$) se evidenció una disminución más marcada de los sólidos solubles en los tratamientos inducidos, lo cual sugiere una mayor actividad microbiana en comparación con los testigos.

Asimismo, en el contraste entre Testigo 1 (Manabí) y Testigo 2 (Esmeraldas) se identificaron diferencias estadísticas significativas en los momentos $^{\circ}\text{Brix}_1$ y $^{\circ}\text{Brix}_4$, mientras que en los demás días evaluados no se registraron diferencias significativas. A pesar de ello, se observó una tendencia general de disminución de los sólidos solubles durante la fermentación, alcanzándose valores cercanos a 11.80°Brix hacia el final del proceso, lo que refleja el consumo progresivo de azúcares por parte de los microorganismos presentes en la masa fermentativa.

Los resultados obtenidos coinciden con diversos estudios reportados en la literatura científica. Cárdenas et al. (2021) observaron que durante el proceso fermentativo del cacao los valores de $^{\circ}\text{Brix}$ disminuyen progresivamente, reportando concentraciones iniciales cercanas a 15°Brix a las 24 horas, que posteriormente descendieron hasta aproximadamente 6°Brix después de 84 horas de fermentación.

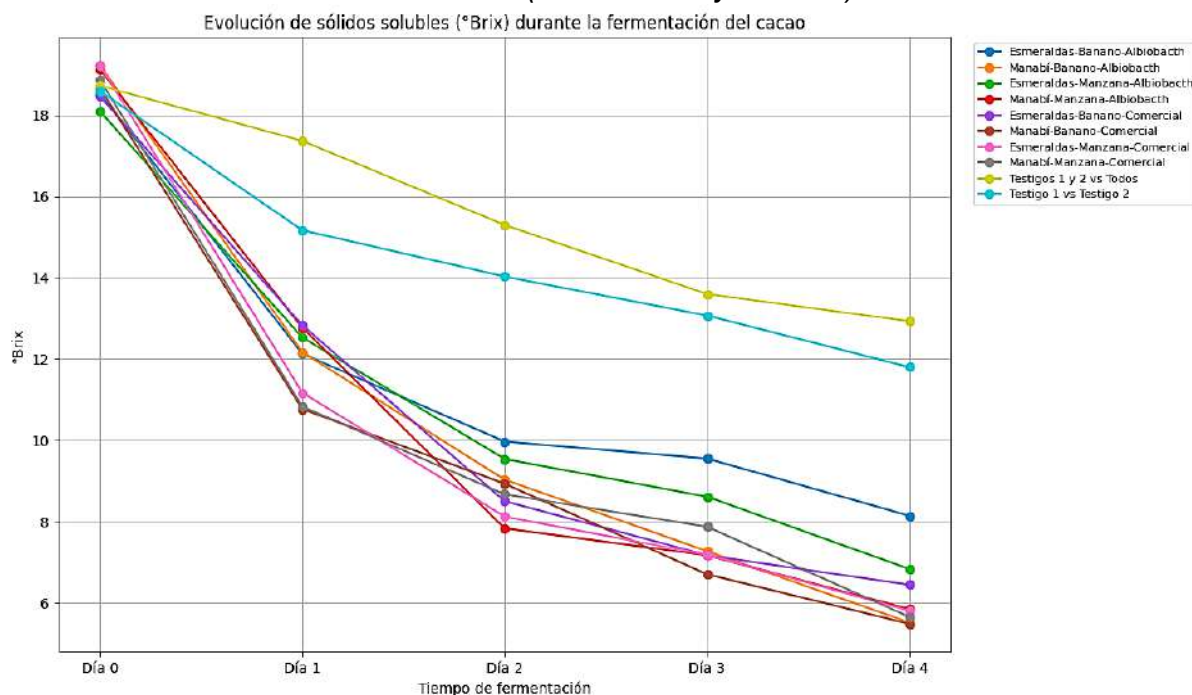
De manera similar, Araujo et al. (2017) señalan que el contenido inicial de sólidos solubles en la pulpa del cacao suele oscilar entre 15 y 20 °Brix, valores que disminuyen conforme avanza la fermentación debido a la actividad metabólica de levaduras y bacterias, las cuales utilizan los azúcares disponibles como fuente de energía. Estos autores también indican que el pH y el contenido de azúcares son factores determinantes para el desarrollo microbiano, especialmente cuando el pH se mantiene por debajo de 5 durante las primeras etapas del proceso.

Por su parte, Navia y Pazmiño (2012) reportaron valores iniciales de 14 °Brix durante la fermentación del cacao, valores que resultan ligeramente inferiores a los encontrados por García et al. (2016), quienes registraron concentraciones iniciales cercanas a 20 °Brix en fermentaciones donde se aplicaron microorganismos durante el proceso anaeróbico de las almendras. Estos valores coinciden con los obtenidos en el presente estudio, lo que respalda la validez de los resultados observados.

Finalmente, Escalante et al. (2013) demostraron que la utilización de extractos enzimáticos provenientes de banano puede potenciar la actividad microbiológica durante la fermentación del cacao. Según estos autores, la presencia de compuestos enzimáticos y sustratos fermentables en el extracto de banano favorece el crecimiento microbiano, lo cual contribuye a una mayor degradación de azúcares y a una fermentación más eficiente, generando efectos positivos en la transformación bioquímica de la masa fermentativa y en el desarrollo de las características sensoriales del cacao.

Figura 16

Efecto de la interacción de Provincia (Esmeraldas y Manabí) C



Nota: en base a la aplicación de Extracto (banano y manzana), y la aplicación de dos Microorganismos (Albiobacth y Comercial) sobre las variables °Brix en el periodo fermentativo (Autores, 2026).

3.4. Temperatura

Los resultados correspondientes a la variable temperatura durante el proceso de fermentación se presentan en la Tabla 7. El análisis estadístico evidenció que el factor Provincia generó diferencias estadísticas significativas en todos los días evaluados, de acuerdo con la prueba de comparación múltiple de Tukey ($p \leq 0.05$).

En este sentido, las almendras provenientes de la provincia de Esmeraldas mostraron un incremento progresivo de la temperatura durante el desarrollo de la fermentación. En el estado inicial del proceso ($Temp_0$) se registró una temperatura aproximada de 32 °C, correspondiente a las condiciones iniciales de la masa fresca de cacao. Posteriormente, en el primer día de fermentación ($Temp_1$) la temperatura aumentó hasta 37.93 °C, evidenciando el inicio de la actividad microbiana. En el segundo día ($Temp_2$) se alcanzó un valor promedio de 43.33 °C, mientras que en el tercer día ($Temp_3$) la temperatura continuó incrementándose hasta 45.67 °C. Finalmente, al cuarto día de fermentación

(Temp₄) se registró un valor máximo de 48.67 °C, indicando una intensificación de los procesos metabólicos propios de la fermentación del cacao.

En relación con el factor Extracto de fruta, el análisis de varianza evidenció diferencias estadísticas únicamente en el primer día de evaluación (Temp₁), donde el tratamiento con extracto de manzana alcanzó una temperatura promedio de 37.93 °C. En los demás momentos del proceso fermentativo no se observaron diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos evaluados.

Por otra parte, al analizar el factor Microorganismos eficientes (Albiobacth y Comercial) se identificaron diferencias estadísticas significativas en los días Temp₁ y Temp₂. En ambos casos, el tratamiento con COMERCIAL presentó los valores más elevados de temperatura, registrando 37.93 °C en Temp₁ y 43.33 °C en Temp₂, lo cual evidencia la influencia de este consorcio microbiano en la intensificación de la actividad fermentativa. En contraste, en los demás días de evaluación no se detectaron diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos.

En cuanto a la interacción entre Provincia y Extracto de fruta, se observó un incremento significativo de la temperatura en los momentos Temp₁ y Temp₄, particularmente en los tratamientos correspondientes a la provincia de Esmeraldas con aplicación de extracto de manzana. Para los demás días de evaluación no se registraron diferencias estadísticas relevantes durante el proceso fermentativo, de acuerdo con el análisis de Tukey ($p \leq 0.05$).

Respecto a la interacción entre Provincia y Microorganismos eficientes, no se evidenciaron diferencias estadísticas concluyentes entre los tratamientos. No obstante, es importante destacar que los valores obtenidos mostraron una tendencia creciente relativamente uniforme, lo cual es característico de la evolución térmica durante la fermentación del cacao.

En la interacción entre Extracto de fruta y Microorganismos eficientes, se registró un aumento significativo de la temperatura en el primer día de fermentación (Temp₁) cuando se combinó el extracto de manzana con el consorcio microbiano Comercial, alcanzando un valor de 37.93 °C. Este resultado sugiere que la

interacción entre ambos factores podría favorecer el inicio de la actividad microbiológica en la masa fermentativa.

Por otro lado, la interacción triple entre Provincia, Extracto de fruta y Microorganismos eficientes no mostró diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos evaluados, de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$), lo que indica que la combinación simultánea de estos factores no generó efectos diferenciados en la evolución de la temperatura durante la fermentación.

En la comparación entre los tratamientos testigo (Testigo 1 correspondiente a Manabí y Testigo 2 correspondiente a Esmeraldas) frente al conjunto de tratamientos experimentales, se observaron diferencias estadísticas significativas en los días Temp₁, Temp₂, Temp₃ y Temp₄. En contraste, en el momento inicial (Temp₀) no se registraron diferencias significativas, ya que todas las unidades experimentales presentaban condiciones térmicas similares al inicio del proceso fermentativo.

Asimismo, al comparar directamente Testigo 1 (Manabí) y Testigo 2 (Esmeraldas) se evidenciaron diferencias altamente significativas, observándose una tendencia creciente en los valores de temperatura a lo largo de los días de fermentación. No obstante, las temperaturas registradas en estos tratamientos no superaron valores cercanos a 43.33 °C.

Los resultados obtenidos coinciden con lo reportado en diversos estudios científicos. Rojas et al. (2021) señalan que durante la fermentación del cacao ocurren cambios térmicos importantes asociados a la actividad microbiológica. Inicialmente, las almendras se encuentran a temperaturas ambientales que oscilan entre 24 y 32 °C; sin embargo, a medida que avanza el proceso fermentativo y se establecen condiciones anaeróbicas durante las primeras 24 horas, la temperatura comienza a incrementarse debido al metabolismo de las levaduras, bacterias y enzimas presentes en la masa fermentativa. Según estos autores, hacia el final del proceso la temperatura puede alcanzar valores entre 48 y 51 °C.

De manera similar, Castillo (2019) menciona que la fermentación del cacao en cajones de madera favorece el incremento de la temperatura interna de la masa, alcanzando valores cercanos a 48 °C después de aproximadamente 96 horas de

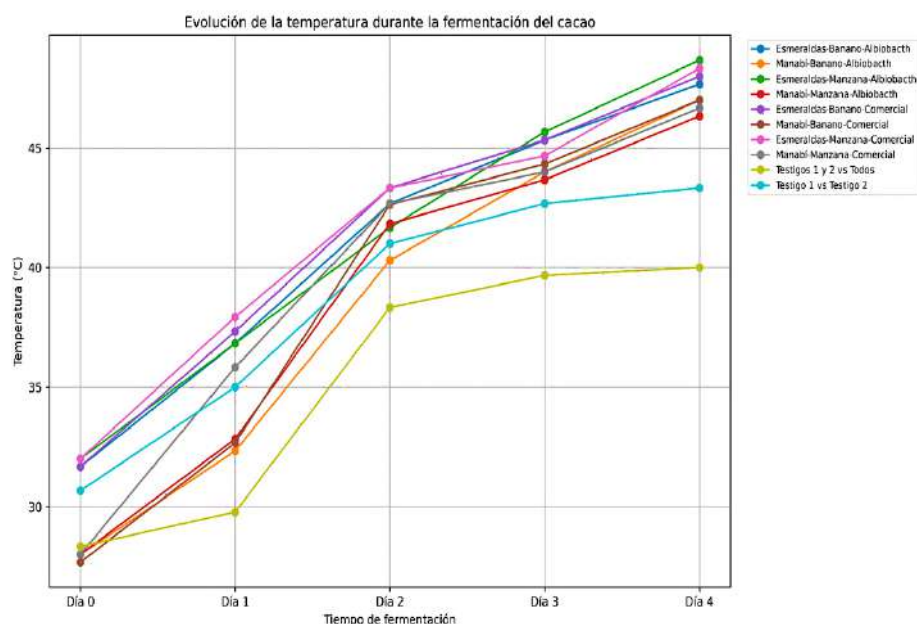
fermentación, lo cual coincide con los resultados obtenidos en la presente investigación.

Por otro lado, Díaz et al. (2022) reportaron que la aplicación de levaduras como *Saccharomyces cerevisiae* durante la etapa de poscosecha del cacao genera un aumento progresivo de la temperatura, registrando valores iniciales cercanos a 30 °C que posteriormente se incrementan durante el proceso fermentativo. Estos autores señalan que temperaturas entre 45 y 50 °C son fundamentales para favorecer la muerte del embrión del grano, permitiendo la penetración de compuestos fermentativos desde la testa hacia el cotiledón, lo que contribuye al desarrollo adecuado de la fermentación interna del cacao.

Asimismo, los autores recomiendan cubrir la masa fermentativa con hojas frescas de plátano, ya que este método permite conservar el calor generado durante la fermentación, evitando pérdidas térmicas y favoreciendo el desarrollo del proceso fermentativo. En concordancia con estos resultados, Ríos et al. (2021) señalan que la incorporación de cepas microbianas seleccionadas puede estimular la actividad fermentativa del cacao, contribuyendo al incremento de la temperatura interna de la masa y, en algunos casos, permitiendo reducir el tiempo necesario para completar el proceso de fermentación.

Figura 17

Efecto de la interacción de Provincia (Esmeraldas y Manabí) D



Nota: en base a la aplicación de Extracto (banano y manzana), y la aplicación de dos Microorganismos (Albiobatch y Comercial) sobre las variables temperatura en el periodo fermentativo (Autores, 2026).

3.5. Variables físicas (prueba de corte)

Los resultados correspondientes a las variables físicas evaluadas mediante la prueba de corte se presentan en la Tabla 8, donde se analizan los efectos de los diferentes factores experimentales sobre la calidad física de las almendras de cacao.

En relación con el factor Provincia, el análisis estadístico evidenció diferencias significativas según la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$) únicamente en la variable humedad. En este caso, las muestras procedentes de Esmeraldas registraron el menor contenido de humedad, con un valor aproximado de 6.27 %, indicando un adecuado nivel de secado del grano. En cuanto a la variable granos mohosos, prácticamente no se registró presencia de este defecto en las almendras evaluadas, reportándose un valor mínimo cercano a 0.03 % en las muestras provenientes de Esmeraldas, lo cual sugiere condiciones adecuadas de fermentación y secado. Para las demás variables analizadas dentro de la prueba de corte no se observaron diferencias estadísticas significativas entre las provincias evaluadas.

Respecto al factor Extracto de fruta (banano y manzana), se identificaron diferencias estadísticas en la variable peso seco, donde el tratamiento con extracto de manzana presentó el valor más alto con aproximadamente 906.33 g. Asimismo, se observaron diferencias significativas en la variable granos mohosos, donde el extracto de banano mostró un comportamiento ligeramente distinto respecto al extracto de manzana. Sin embargo, para el resto de las variables evaluadas no se registraron diferencias significativas según la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$).

Diversos estudios han señalado que la fermentación inducida mediante la adición de levaduras, enzimas o compuestos fenólicos puede incrementar significativamente el porcentaje de almendras bien fermentadas, alcanzando valores cercanos al 80 %. En contraste, fermentaciones naturales sin adición de microorganismos o agentes bioactivos suelen presentar porcentajes cercanos al 20 % de fermentación efectiva, lo que demuestra que la utilización de inoculantes fermentativos puede mejorar el rendimiento del cotiledón y la calidad final del grano (Guevara & Morales, 2017).

En cuanto al factor Microorganismos eficientes (Albiobacth y Comercial), el análisis estadístico mostró diferencias significativas en las variables peso seco y humedad. En ambos casos, el tratamiento con COMERCIAL presentó los resultados más favorables, evidenciando un mayor peso seco y un contenido de humedad cercano a 6.27 %, lo cual indica una mejor condición de secado y estabilidad del grano. En la variable granos mohosos, el tratamiento con Albiobacth presentó una ligera diferencia respecto a Comercial, registrándose un valor cercano a 0.03 %, aunque en términos generales la presencia de moho fue mínima en todos los tratamientos. Para las demás variables evaluadas no se detectaron diferencias estadísticas significativas; sin embargo, se observó un alto porcentaje de almendras bien fermentadas en los tratamientos que incluyeron microorganismos eficientes.

En condiciones anaeróbicas durante la fermentación del cacao, el porcentaje de almendras pizarrosas suele mantenerse bajo, generalmente inferior al 2 %. No obstante, cuando se aplican microorganismos durante la fermentación, este valor puede reducirse hasta aproximadamente 0.6 %, debido a la acción directa de los microorganismos sobre el cotiledón, favoreciendo la transformación interna del grano. Este proceso se ve favorecido además por la realización adecuada de remociones durante la fermentación, especialmente a partir de las primeras 24 horas, lo cual mejora la distribución térmica y la actividad microbiana en la masa fermentativa.

En el análisis de la interacción Provincia × Extracto, se observó un comportamiento significativo en las variables humedad y granos mohosos, particularmente en el tratamiento correspondiente a Esmeraldas con extracto de banano. Para las demás variables físicas evaluadas después del proceso de fermentación y secado no se registraron diferencias significativas según la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$).

Por otro lado, la interacción Provincia × Microorganismos eficientes no presentó diferencias estadísticas concluyentes para las variables analizadas. No obstante, es importante señalar que los valores obtenidos en esta investigación muestran coherencia con los resultados observados en los tratamientos testigo y en los tratamientos con aplicación de microorganismos.

En el caso de la interacción Extracto × Microorganismos eficientes, se observaron diferencias significativas en las variables peso seco y humedad, destacándose los tratamientos correspondientes a la combinación de extracto de manzana con Comercial, así como extracto de banano en la variable humedad, lo que sugiere una posible interacción favorable entre estos factores durante el proceso fermentativo.

En la interacción triple (Provincia × Extracto × Microorganismos eficientes) se identificaron diferencias estadísticas en la variable humedad, particularmente en el tratamiento correspondiente a Esmeraldas con extracto de banano y aplicación de Comercial, donde se observó un comportamiento significativo según la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Asimismo, en la variable índice de semilla, el tratamiento correspondiente a Manabí con extracto de manzana y Comercial mostró el valor más favorable (1.86 %), mientras que los demás tratamientos no presentaron diferencias estadísticas relevantes.

En la comparación entre tratamientos testigo (sin aplicación) y tratamientos con aplicación, se observaron diferencias estadísticas significativas en diversas variables. Los testigos presentaron menores valores de peso seco (750.33 g), mayor contenido de humedad (8.07 %), porcentaje de testa de 16.44 %, cotiledón de 83.56 % y índice de semilla de 1.55 %. Asimismo, el porcentaje de almendras fermentadas fue de aproximadamente 47.67 %, valores inferiores a los registrados en los tratamientos que recibieron aplicaciones experimentales.

Al comparar directamente Testigo 1 (Manabí) y Testigo 2 (Esmeraldas), se observó una diferencia estadística significativa únicamente en la variable humedad, con un valor aproximado de 7.13 %, mientras que las demás variables evaluadas no mostraron diferencias estadísticas relevantes.

Diversos autores han reportado resultados similares en investigaciones relacionadas con la calidad física del cacao. Zúñiga (2021) señala que para obtener aproximadamente 1 kg de cacao seco se requieren entre 14 y 20 mazorcas, dependiendo del peso individual del fruto. De manera similar, Pacheco (2018) reportó valores entre 990 y 1100 g de cacao por cada 15 mazorcas, lo que coincide con los rangos observados en la presente investigación.

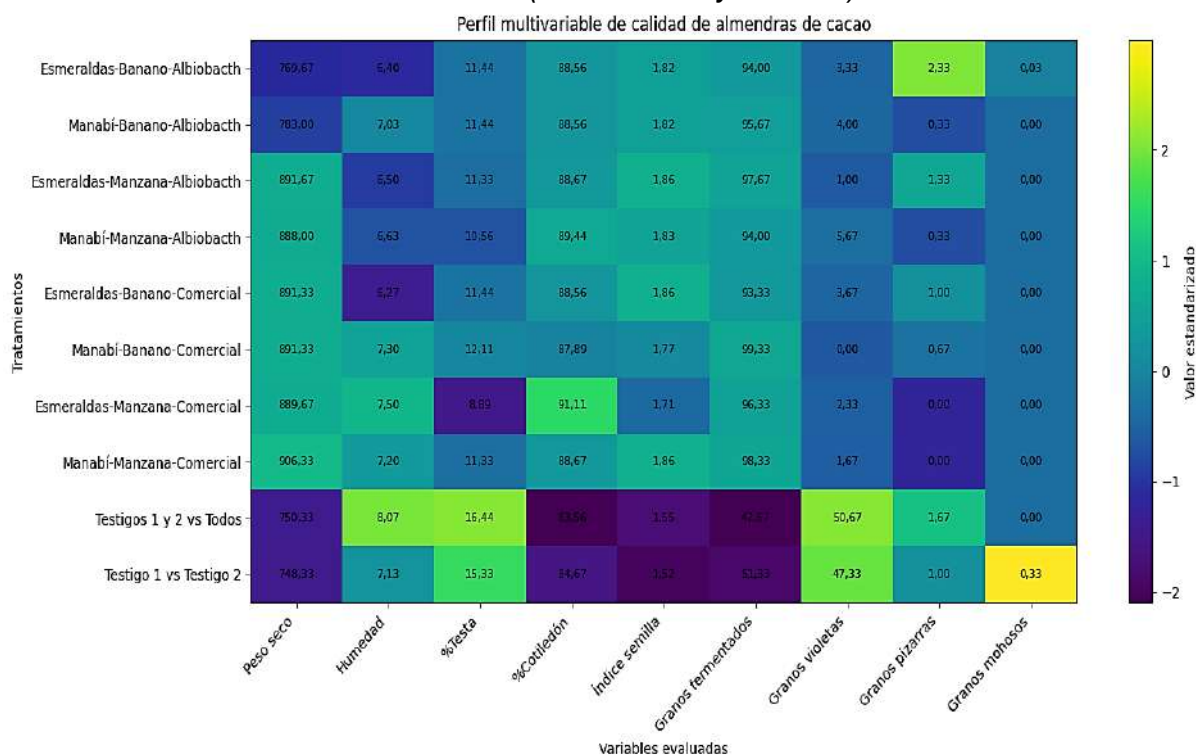
En cuanto al contenido de humedad, Sandoval y Horta (2021) reportaron valores entre 6.2 % y 7.8 %, indicando que el nivel óptimo para el almacenamiento del cacao debe mantenerse entre 7 % y 8 %. Valores inferiores pueden provocar que el grano se vuelva frágil y quebradizo, mientras que contenidos superiores al 9 % favorecen el desarrollo de mohos. De forma complementaria, Barreiro y Sandoval (2020) señalan que las almendras de cacao deben almacenarse bajo condiciones de temperatura estable y en envases impermeables, con el fin de evitar la contaminación y preservar la calidad del grano.

Por otro lado, Pargon (2021) evaluó diferentes tipos de fermentadores y encontró que los cajones de madera favorecen un mayor porcentaje de almendras bien fermentadas, reportando aproximadamente 13 % de testa y 79 % de cotiledón, parámetros utilizados para evaluar el rendimiento del grano. Estos resultados coinciden con los reportados por Sánchez y Mestanza (2019), quienes también observaron valores similares en sistemas de fermentación controlada.

Finalmente, Medina y Rojas (2020) reportaron que la aplicación de levaduras y mezclas microbianas durante la fermentación del cacao puede generar hasta 70 % de almendras bien fermentadas, mientras que 20 % corresponden a granos violetas y 10 % a granos pizarrosos o con defectos. Estos resultados evidencian mejoras significativas en comparación con fermentaciones tradicionales, donde los porcentajes de fermentación suelen ser inferiores al 50 %. De manera similar, Salous (2019) reportó valores cercanos al 65 % de fermentación adecuada mediante la aplicación de bacterias seleccionadas. Asimismo, Rivera et al. (2012) compararon cuatro métodos de fermentación (sacos, montón, cajones de madera y tinas) durante un periodo de cinco días, concluyendo que los cajones de madera proporcionan mejores condiciones para lograr una fermentación más eficiente del cacao.

Figura 18

Efecto de la interacción de Provincia (Esmeraldas y Manabí) E



Nota: en base a la aplicación de Extracto (banano y manzana), y la aplicación de dos Microorganismos (Albiobacth y Comercial) sobre las variables físicas (prueba de corte) que se muestra en la siguiente tabla (Autores, 2026).

3.6. Variable química cadmio

Los resultados correspondientes al análisis químico del contenido de cadmio (Cd^{2+}) en el cotiledón de las almendras de cacao se presentan en la Tabla 9, donde se evalúa el efecto de los diferentes factores experimentales aplicados durante el proceso de fermentación.

En relación con el factor Provincia, el análisis de varianza mostró diferencias estadísticas altamente significativas según la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Los resultados indican que las almendras provenientes de Manabí presentaron el menor contenido de cadmio, registrando un valor promedio de 0.47 mg Kg^{-1} , lo cual evidencia que las condiciones de fermentación y la aplicación de los tratamientos experimentales favorecieron la reducción del metal en esta zona de estudio.

En cuanto al factor Extracto de fruta, el análisis estadístico indicó que el extracto de manzana fue el tratamiento que presentó mayor eficiencia en la reducción del contenido de cadmio en las almendras de cacao. Este comportamiento se reflejó

claramente en los resultados presentados en la Tabla 9, donde se observaron diferencias estadísticas significativas según la prueba de rangos múltiples de Tukey ($p \leq 0.05$). Este efecto podría estar relacionado con la presencia de compuestos fenólicos y enzimas oxidativas presentes en la manzana, los cuales podrían favorecer procesos de interacción o complejación con metales pesados durante la fermentación.

Por otra parte, el análisis de varianza (ANOVA) evidenció que la aplicación de microorganismos eficientes (Albiobacth y Comercial) desempeñó un papel importante en la etapa de poscosecha, particularmente durante la fermentación, mostrando un alto potencial para disminuir la concentración de cadmio presente en el cotiledón del grano de cacao.

En relación con la interacción entre Provincia y Extracto de fruta, se observó que el tratamiento correspondiente a Manabí con extracto de manzana generó un efecto significativo en la reducción del contenido de cadmio en las almendras. Este resultado evidenció diferencias estadísticas significativas según la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$), lo que sugiere que la combinación entre el origen del cacao y el tipo de extracto aplicado puede influir en la reducción del metal pesado durante el proceso fermentativo.

Asimismo, en la interacción Provincia $\times$ Microorganismos eficientes, los resultados indicaron que la combinación de Manabí con el microorganismo Comercial fue la que presentó el mejor desempeño en la reducción de cadmio, mostrando valores inferiores al resto de los tratamientos evaluados. Este comportamiento fue estadísticamente significativo de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$).

Por otro lado, al analizar la interacción triple entre Provincia, Extracto de fruta y Microorganismos eficientes, no se registraron diferencias estadísticas significativas según la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Este resultado sugiere que la combinación simultánea de estos factores puede contribuir a la disminución del contenido de cadmio en las almendras de cacao independientemente de la ubicación geográfica del cultivo.

En la comparación entre los tratamientos testigo (Testigo 1 correspondiente a Manabí y Testigo 2 correspondiente a Esmeraldas) frente al conjunto de

tratamientos experimentales, se observaron diferencias estadísticas significativas según la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). En este caso, el contenido de cadmio en el Testigo 1 (Manabí) fue de 1.22 mg Kg^{-1} , valor inferior al registrado en el Testigo 2 (Esmeraldas), donde se obtuvo 1.35 mg Kg^{-1} . Estos resultados evidencian que la aplicación de tratamientos experimentales contribuyó a reducir significativamente la concentración de cadmio en comparación con los tratamientos sin aplicación.

Al comparar directamente Testigo 1 (Manabí) frente a Testigo 2 (Esmeraldas), también se identificaron diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0.05$), confirmando que las almendras provenientes de Esmeraldas presentaron mayor contenido de cadmio en comparación con las muestras de Manabí.

Diversos estudios reportados en la literatura científica respaldan estos resultados. Batallas et al. (2021) evaluaron la presencia de cadmio (Cd^{2+}) y plomo (Pb) en almendras de cacao y observaron que niveles bajos de pH y condiciones de mayor acidez pueden favorecer la acumulación de cadmio en la testa y en el cotiledón del grano. En su investigación reportaron valores superiores a 2.55 mg Kg^{-1} de cadmio en la testa, mientras que en el cotiledón los valores alcanzaron aproximadamente 1 ppm, niveles que superan los límites establecidos en diversas normativas internacionales.

Por otra parte, Aldas et al. (2020) reportaron concentraciones mucho menores de cadmio en procesos de fermentación realizados en cajones de madera, obteniendo valores inferiores a 0.01 mg Kg^{-1} bajo condiciones adecuadas de fermentación y control de parámetros fisicoquímicos como pH y acidez.

En el mismo sentido, Shilthon et al. (2018) observaron que valores de pH más elevados durante la fermentación tienden a asociarse con menores concentraciones de cadmio en el grano, en comparación con tratamientos control sin intervención microbiológica. Sin embargo, estos autores señalan que niveles excesivamente altos de pH en la testa pueden afectar negativamente la calidad fisicoquímica del cacao, generando problemas en el procesamiento posterior del grano.

De forma similar, López et al. (2020) reportaron concentraciones de cadmio en cacao entre 0.60 y 0.75 mg Kg^{-1} , asociadas a valores de pH comprendidos entre

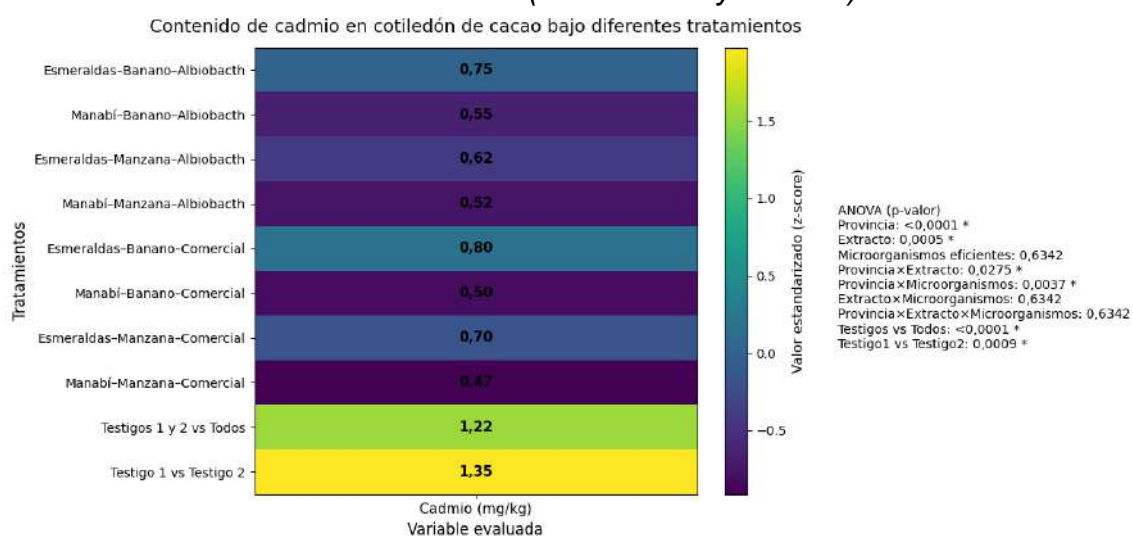
4.8 y 5.0, rangos que presentan concordancia con los resultados obtenidos en la presente investigación.

Desde el punto de vista microbiológico, diversos estudios han demostrado que algunos microorganismos pueden contribuir a la remediación o reducción de metales pesados en matrices alimentarias y agrícolas. Beltrán y Gómez (2016) reportaron que bacterias como *Ralstonia eutropha* poseen capacidad para interactuar con metales pesados, lo que permite su utilización potencial en procesos de bioremediación de cadmio en granos de cacao. De manera similar, Canchignia et al. (2021) señalaron que ciertas bacterias aerobias pueden favorecer procesos de inmovilización o expulsión de cadmio, facilitando su eliminación a través del mucílago durante el proceso fermentativo del cacao.

En conjunto, estos resultados sugieren que la aplicación de microorganismos eficientes y extractos frutales durante la fermentación del cacao puede representar una estrategia prometedora para reducir el contenido de cadmio en las almendras, contribuyendo así a mejorar la calidad del producto y a cumplir con los límites establecidos en normativas internacionales para la comercialización del cacao.

Figura 19

Efecto de la interacción de Provincia (Esmeraldas y Manabí)



Nota: en base a la aplicación de Extracto (banano y manzana), y la aplicación de dos microorganismos (Albiobacth y Comercialg) sobre el análisis químico para determinar cadmio en cotiledón de las almendras de cacao (Autores, 2026).

Tasa de disminución:

La Gráfica 1 presenta la concentración de cadmio (Cd^{2+}) expresada en mg Kg^{-1} en las almendras de cacao obtenidas de las provincias de Manabí y Esmeraldas, evaluadas bajo diferentes tratamientos aplicados durante el proceso fermentativo. En el eje horizontal se muestran los tratamientos experimentales (Testigo M, Testigo E y tratamientos t1–t8), mientras que el eje vertical representa el contenido de cadmio en las muestras analizadas. Los colores diferencian el origen de las muestras: verde para Manabí y azul para Esmeraldas.

En los tratamientos testigo, se observa que las almendras provenientes de Esmeraldas presentan el mayor contenido inicial de cadmio (1.35 mg Kg^{-1}), mientras que las muestras de Manabí registran un valor ligeramente menor (1.22 mg Kg^{-1}). Estos valores evidencian la presencia inicial del metal pesado en las almendras antes de la aplicación de los tratamientos fermentativos.

Posteriormente, los tratamientos experimentales (t1–t8) muestran una disminución progresiva en la concentración de cadmio, lo cual sugiere un efecto favorable de las estrategias aplicadas durante la fermentación del cacao. En Esmeraldas, los valores de cadmio fluctúan entre 0.75 y 0.62 mg Kg^{-1} en los primeros tratamientos, alcanzando valores cercanos a 0.70 mg Kg^{-1} en tratamientos posteriores. Por su parte, en Manabí se observan valores menores, destacándose reducciones hasta 0.47 mg Kg^{-1} en el tratamiento final (t8), lo que indica una mayor eficiencia en la reducción del metal pesado en esta provincia.

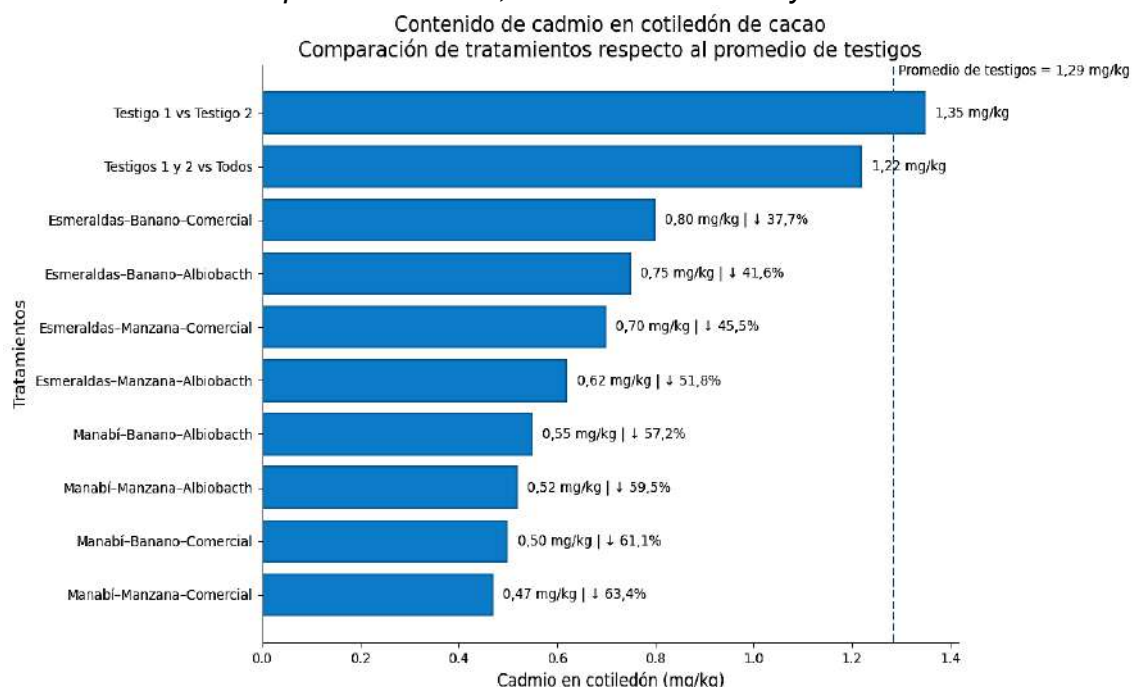
Adicionalmente, la gráfica incluye la tasa de disminución porcentual del cadmio, donde se evidencia una reducción de 58.20% para las muestras de Manabí y 63.25% para Esmeraldas en comparación con los tratamientos testigo. Estos resultados reflejan que la aplicación de microorganismos eficientes y extractos de frutas durante la fermentación puede contribuir significativamente a la reducción del contenido de cadmio en las almendras de cacao.

En conjunto, los datos presentados en la gráfica demuestran que los tratamientos aplicados durante la fermentación tienen un efecto positivo en la mitigación del cadmio, permitiendo reducir considerablemente la concentración del metal pesado en los granos de cacao, lo cual resulta relevante para mejorar la calidad

del producto y cumplir con los límites establecidos por normativas internacionales para la comercialización del cacao.

Figura 20

Análisis de Cadmio por tratamiento, Provincias Manabí y Esmeraldas



Nota: (Autores, 2026).

3.7. Conclusiones

La aplicación de microorganismos eficientes (Albiobacth y Comercial) durante el proceso fermentativo de la masa de cacao de la variedad CCN-51 demostró ser una estrategia efectiva para mejorar los parámetros de calidad del grano. Los resultados obtenidos evidenciaron diferencias estadísticas significativas en las variables pH, °Brix y temperatura, lo que indica que la inducción microbiana influyó directamente en la dinámica fermentativa del cacao. Además, los valores alcanzados se mantuvieron dentro de los rangos establecidos por la Norma INEN 176:2018, lo que confirma que el proceso fermentativo aplicado permitió obtener almendras con condiciones adecuadas de calidad.

La combinación de microorganismos eficientes (Albiobacth y Comercial) junto con extracto de fruta de manzana mostró un efecto positivo en la reducción del contenido de cadmio (Cd^{2+}) en las almendras de cacao. Los resultados evidenciaron una disminución aproximada del 63 % en la finca ubicada en

Esmeraldas y del 52 % en la finca localizada en Manabí, lo cual demuestra el potencial de esta estrategia como alternativa biotecnológica para la mitigación de metales pesados durante la etapa poscosecha del cacao.

En consecuencia, la implementación de este método fermentativo basado en microorganismos eficientes y extractos naturales representa una alternativa viable y sostenible para reducir la contaminación por cadmio en almendras de cacao, contribuyendo a que los productores puedan cumplir con los límites establecidos por la Unión Europea y el Codex Alimentarius para la exportación de cacao y sus derivados, fortaleciendo así la competitividad del cacao ecuatoriano en mercados internacionales.

3.8. Recomendaciones

Se recomienda realizar evaluaciones sensoriales y análisis organolépticos en cacao sometido a la inducción de microorganismos eficientes (Albiobacth y COMERCIAL) combinados con extractos de frutas, con el fin de determinar su impacto en las características de aroma, sabor, textura y color durante la elaboración de chocolate. Estos estudios permitirán verificar si el tratamiento fermentativo aplicado, además de contribuir a la reducción de cadmio, también mejora o mantiene los atributos sensoriales del producto final.

Se sugiere desarrollar investigaciones futuras que evalúen diferentes concentraciones de microorganismos eficientes (COMERCIAL y Albiobacth) aplicados de manera independiente, es decir sin la adición de extractos de frutas, con el propósito de analizar su eficacia en la reducción de cadmio en variedades de cacao que presentan mayor capacidad de absorción y acumulación de este metal pesado en las almendras.

Asimismo, se recomienda ampliar este tipo de estudios en diferentes condiciones edafoclimáticas y sistemas de manejo del cultivo, con el objetivo de validar la efectividad de los microorganismos eficientes como una estrategia biotecnológica sostenible para la mitigación de cadmio en cacao, contribuyendo al cumplimiento de los estándares internacionales de inocuidad alimentaria y exportación.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Referencias Bibliográficas

- Abad, A., Acuña, C., & Naranjo, E. (2020). El cacao en la Costa ecuatoriana: estudio de su dimensión cultural y económica. *Estudios de La Gestión. Revista Internacional de Administración*, 7, 59–83. <https://doi.org/https://doi.org/10.32719/25506641.2020.7.3>
- Abreu, G., Araujo, Q., & Valle, R. (2017). Influencia de factores agroambientales sobre la calidad del clon de cacao (*Theobroma cacao* L.) PH-16 en la región cacaotera de Bahia, Brasil. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 4(12), 1–18. <https://doi.org/10.19136/era.a4n12.1274>
- Acevedo, A., Linares Barrantes, C., & Cachay Boza, O. (2013). Investigación en la acción. Un ejemplo de estudio experimental en el mercadeo de servicios. *Revista de La Facultad de Ingeniería Industrial*, 16(2), 79-. <https://doi.org/10.15381/idata.v16i2.11925>
- Acosta, J. (2017). CLONACIÓN, SECUENCIACIÓN Y CARACTERIZACIÓN MOLECULAR DE GENES CODIFICANTES DE POLIFENOL OXIDASA (PPO) EN *Theobroma cacao* L. (CACAO) EN EL CANTÓN QUEVEDO- PROVINCIA DE LOS RÍOS. In *Tesis*.
- Afoakwa, E., Kongor, J., Budu, A., & Takrama, J. F. (2015). CHANGES IN SOME BIOCHEMICAL QUALITIES DURING DRYING OF PULP PRE-CONDITIONED AND FERMENTED COCOA (*THEOBROMA CACAO*) BEANS. *African Scholarly*, 15(1), 9651–9670.
- Aldas, J., Neira, J., Revilla, K., & Sánchez, S. (2020). Métodos de fermentación del cacao nacional (*Theobroma cacao*) y su influencia en las características físico-químicas, contenido de cadmio y perfiles sensoriales. *Alternativas UCSG*, 21(3), 42–48. <https://doi.org/https://doi.org/10.23878/alternativas.v21i3.339>
- Almeida, A., & Valle, A. (2007). Ecophysiology of the cacao tree. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 19(4), 1–34. <https://doi.org/https://doi.org/10.1590/S1677-04202007000400011>
- Alvarado, K., Vera, J., Tuarez, D., & Intriago, F. (2022). Fermentación de cacao (*Theobroma cacao* L.) con adición de levadura (*Saccharomyces cerevisiae*) y enzima (PPO's) en la disminución de metales pesados. *Centrosur*.
- Álvarez, C., Tovar, L., García, H., Morillo, F., Sánchez, P., Girón, C., & Farias, A. (2010). Evaluación de la calidad comercial del grano de cacao (*Theobroma cacao* L.) usando dos tipos de fermentadores. *Revista Científica UDO Agrícola*, 10(1), 76–87. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3909942>
- Andrade, J., Rivera García, J., Chire Fajardo, G., & Ureña Peralta, M. (2019). *Propiedades físicas y químicas de cultivares de cacao (Theobroma cacao L.) de Ecuador y Peru* (Vol. 10, Issue 4). http://scielo.senescyt.gob.ec/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1390-

- [65422019000400001&lng=es&nrm=iso&tlng=es](https://doi.org/10.19136/era.a4n12.1274)
- Araujo, Q. R. De, Valle, R. R., Maria, S., & Souza, M. De. (2017). cacao L.) PH-16 en la región cacaotera de Bahia , Brasil In uence of agro-environmental factors on the quality of cacao (Theobroma clone PH-16 in the cacao region of Bahia , Brazil cacao L.). 4(12), 579–587. <https://doi.org/10.19136/era.a4n12.1274>
- Arellanos, E., García, A., Angulo, F., Hernández, A., Corazon, M., Alburquerque, J., Guerrero, J., Vneros, J., Rojas, N., Chavez, S., & Oliva, M. (2021). Global studies of cadmium in relation to Theobroma cacao: A bibliometric analysis from Scopus (1996 -2020). *Scientia Agropecuaria*, 12(4), 611–623. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2021.065>
- Arévalo, E., Arévalo, C., Baligar, V., & He, Z. (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/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.06.122](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.06.122)
- Arguello, D., Chavez, E., Lauryssen, 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(1), 120–127. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.292](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.292)
- Ayestas, E. D. (2009). *Caracterización morfológica de cien árboles promisorios de Theobroma cacao L. en Waslala, RAAN, Nicaragua, 2009*. Universidad Nacional Agraria.
- Badui, S. (2006). Salvador Badui Dergal. In *Química de los alimentos*.
- Balboa, C., & Vergara, L. (2021). Potencial aplicación de bacterias ácido lácticas en sistemas de tratamientos de agua. *Ecosistemas Revista Científica de Ecología y Medio Ambiente*, 30(2), 1–9. [https://doi.org/https://doi.org/10.7818/ECOS.2224](https://doi.org/10.7818/ECOS.2224)
- Barreiro, J. A., & Sandoval, A. J. (2020). Kinetics of moisture adsorption during simulated storage of whole dry cocoa beans at various relative humidities. *Journal of Food Engineering*, 273, 109869. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.109869](https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.109869)
- Barrera, H., & Rodríguez, I. (2014). La reacción en cadena de la polimerasa a dos décadas de su invención. *Ciencia UANL*, VII, 323–335. <http://eprints.uanl.mx/1584/>
- Barrientos, L., Arvizu, M. L., Pérez, E. S., Rodríguez, S. V., Radillo, J. J. V., Azucena, B., Reyes, B., & Ruiz, A. (2018). *and under cultivation Physalis chenopodifolia Lam . At present , there is a great interest in the search for ingredients that provide health*. 10(51).
- Batallas, M., Preciado, M., & Pesantez, F. (2021). Evaluación de cadmio y plomo en almendras de cacao por espectroscopia de absorción atómica. *Ciencia Unemi*, 14(37), 49–59. <https://doi.org/10.29076/issn.2528-7737vol14iss37.2021pp49-59p>

- Batista, L. (2018). Guía técnica el cultivo de cacao. *Santo Domingo, Republica Dominicana. Centro Para El Desarrollo Agropecuario y Forestal CEDAF*, 2(1), 1–232.
<http://www.cedaf.org.do/publicaciones/guias/download/cacao.pdf>
- Baudilio, J., & Cumana, L. (2005). Revisión taxonómica del género *Theobroma* (Sterculiaceae) en Venezuela. *Acta Botánica Venezuelica*, 1(28), 113–133.
- Beltrán, M., & Gómez, A. (2016). BIORREMEDIACIÓN DE METALES PESADOS CADMIO (Cd), CROMO (Cr) Y MERCURIO (Hg) MECANISMOS BIOQUÍMICOS E INGENIERÍA GENÉTICA. *Nueva Granda, Cd*, 172–197.
<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.18359/rfcb.2027>
- Bertorelli, L., Camacho, G., & Fariñas, L. (2014). Efecto del secado al sol sobre la calidad del grano fermentado de cacao. *Agronomía Tropical*, 54(1), 31–43.
- Canchignia, F., Auhing, J., & Cedeño, Á. (2021). MITIGACIÓN DE CADMIO POR MICROORGANISMOS.
- Cardenas, Y., García, E., & Leandro, C. (2021). RENDIMIENTO DE ALCOHOL DE MUCÍLAGO DE CACAO (*Theobroma cacao* L.) DE LOS CLONES CCN-51 E IMC-67 CON EL USO DE LEVADURA COMERCIAL (*Saccharomyces cerevisiae* Meyen ex E.C. Hansen). *ALCOHOL*. 1(1), 1–13.
- Cardona, L. M., Rodríguez-Sandoval, E., & Cadena Chamorro, E. M. (2016). Diagnóstico de las prácticas de beneficio del cacao en el departamento de Arauca. *Revista Lasallista de Investigación*, 13(1), 94–104.
<https://doi.org/10.22507/rli.v13n1a8>
- Carrillo, M., Freitas, R., Fernandes, R., Fontes, M., & Jordão, C. (2013). Sorption of Cadmium in Some Soil Amendments for In Situ Recovery of Sorption of Cadmium in Some Soil Amendments for In Situ Recovery of Contaminated Soils. *Water Air Soil Pollut, January*. <https://doi.org/10.1007/s11270-012-1418-8>
- Castillo, J. (2019). *Diseño de un fermentador orientado a mejorar el proceso de fermentacion de cacao criollo blanco de Piura*.
- Chancay, 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
- Chávez, Baviera, J. M. B., & Pérez-Esteve, É. (2022). *Valuation Strategies for the Biomass Generated While Producing and Transforming Cocoa into Chocolate BT - Trends in Sustainable Chocolate Production* (C. M. Galanakis (ed.); pp. 325–350). Springer International Publishing.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-90169-1_10
- Codex Alimentarius. (2016). *NORMA PARA EL CHOCOLATE Y LOS PRODUCTOS DEL CHOCOLATE*.
- Comisión Europea. (2021). REGLAMENTO (UE) 2021/1323. *Diario Oficial de La Unión Europea*, 10(1), 13–18.

- Contreras, J., & Pérez, M. (2017). Instructivo para el control de calidad de granos de cacao. *Swisscontact Colombia*, 1–17.
- Corona, J. (2016). Apuntes sobre métodos de investigación. *Medisur*, 14(1), 81–82.
- Criollo, J., Criollo, D., & Aldana, A. (2010). Fermentación de la almendra de copoazú (*Theobroma grandiflorum* [Willd. ex Spreng.] Schum.): evaluación y optimización del proceso. *Agroindustria*, 11, 107–115.
- Cruz, E., & Pereira, I. (2009). Historias, Saberes y Sabores en torno al cacao (*Theobroma cacao* L.) en la subregión de Barlovento, Estado Miranda. *Sapiens*, 10(2), 97–120.
- Cruz, Rodríguez, N., Chávez, B., & Gómez, I. (2022). *El cultivo del cacao , sus características y su asociación con microorganismos durante la fermentación*. 7(25), 36–51.
- Díaz, C., Van de Voorde, D., Tuentner, E., Lemarcq, V., Van de Walle, D., Soares Maio, J. P., Mencía, A., Hernandez, C. E., Comasio, A., Sioriki, E., Weckx, S., Pieters, L., Dewettinck, K., & De Vuyst, L. (2022). An in-depth multiphasic analysis of the chocolate production chain, from bean to bar, demonstrates the superiority of *Saccharomyces cerevisiae* over *Hanseniaspora opuntiae* as functional starter culture during cocoa fermentation. *Food Microbiology*, 109, 104115. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fm.2022.104115](https://doi.org/10.1016/j.fm.2022.104115)
- EMBIOECSA. (2021). *F icha Técnica F icha Técnica* (pp. 1–4).
- Erazo, C., Bravo, K., Tuárez, D., Fernández, Á., Torres, Y., & Vera, J. (2021). Efecto de la fermentación de cacao (*theobroma cacao* L.), variedad nacional y trinitario, en cajas de maderas no convencionales sobre la calidad física y sensorial del licor de cacao. *Revista de Investigación Talentos*, 8(2), 42–55. <https://doi.org/10.33789/talentos.8.2.153>
- Escalante, P., Ibarra-junquera, V., Puente-preciado, J. H., Moisés, A., Ornelaspaz, J. D. J., Pérez-martínez, J. D., Orozco-santos, M., Vij, P. E. M., Amcr, J., Bioingeniería, L. De, Universidad, F. I. C., Colima, D. C., Centro, J., Investigación, D., Cuauhtémoc, D. A. C., Cuauhtémoc, C., Facultad, J., Químicas, D. C., Autónoma, U., ... Tecomán, E. (2013). OPTIMIZACIÓN DE LA EXTRACCIÓN ENZIMÁTICA DE JUGO DE BANANO A PARTIR DE LOS CULTIVARES ENANO GIGANTE, FHIA-17 Y FHIA-23. *Universidad y Ciencia*, 29(1), 1–9.
- Fariñas, L., Bertorelli, L., Angulo, J., & Parra, P. (2002). Características físicas del fruto de cacaos tipos criollo, forastero y trinitario de la localidad de cumboto, venezuela. *Agronomía Tropical*, 52(3), 343–362.
- Florida, R. N. (2021). Cadmium in soil and cacao beans of Peruvian and south American origin. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 74(2), 9499–9515. <https://doi.org/10.15446/rfnam.v74n2.91107>
- García, C., Giraldo, G., Hurtado, H., & Mendivil, C. (2006). *Cinética enzimática de la polifenol oxidasa del banano gros michel en diferentes estados de maduración*. 13–19.

- García, C., Giraldo, G., Hurtado, H., & Mendivil, C. (2016). Cinética Enzimática De La Polifenol Oxidasa Del Banano Gros Michel En Diferentes Estados De Maduración. *Facultad De Química Farmacéutica*, 1–7.
- Gauchi, V. (2017). Estudio de los métodos de investigación y técnicas de recolección de datos utilizadas en bibliotecología y ciencia de la información. *Revista Espanola de Documentacion Cientifica*, 40(2), 1–13. <https://doi.org/10.3989/redc.2017.2.1333>
- Germon, A. (2013). MAZORCAS DE CACAO Y LAS FUENTES DE INÓCULO EN EL DESAROLLO DE LA MONILIASIS (Moniliophthora Roreri) Práctica formativa para obtener el diploma de Ingeniera Agrónoma Tutor : Jacques Avelino Julio 2012- Febrero 2013 RESUMEN. *Centro Agropecuario Tropical de Investigacion y Enseñanza.*, 2(1), 37.
- Graziani, L., Ortiz de Bertorelli, L., Angulo, J., & Parra, P. (2012). Características físicas del fruto de cacaos tipos criollo, forastero y trinitario. *Agronomia Tropical*, 52(3), 1–9. http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0002-192X2002000300006
- Guevara, K. V., & Morales, W. J. (2017). *Adición de enzimas y levaduras sobre los cambios químicos y organolépticos del cacao (Theobroma cacao L) Clon CCN-51*. Universidad Técnica Estatal de Quevedo.
- Halevy, A. H. (2018). Theobroma cacao. *CRC Handbook of Flowering*, 5(1753), 1–414. <https://doi.org/10.1201/9781351072571>
- Hernández, Y., Rodríguez-Hernández, P., Peña-Icart, M., Meriño-Hernández, Y., Cartaya-Rubio, O., Hernández-Baranda, Y., Rodríguez-Hernández, P., Peña-Icart, M., Meriño-Hernández, Y., & Cartaya-Rubio, O. (2019). Toxicidad del Cadmio en las plantas y estrategias para disminuir sus efectos. Estudio de caso: El tomate. *Cultivos Tropicales*, 40(3). http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0258-59362019000300010&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- INEN. (1986). Cacao en gramo, ensayos de corte NTE INEN 175. *Instituto Ecuatoriano de Normalización*, 1–3.
- INEN. (2018a). Granos de cacao. Requisitos NTE INEN 176-5. *Norma Técnica Ecuatoriana*, 5, 8.
- INEN. (2018b). Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 176. *Febrero*, 5, 2–9. https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/nte_inen_176-5.pdf
- Intriago, F., Talledo, M., Cuenca, G., Macías, J., Álvarez, J., & Menjívar, J. (2019). Evaluación del contenido de metales pesados en almendras de cacao (Theobroma cacao L) durante el proceso de beneficiado. *Pro Sciences: Revista de Producción, Ciencias e Investigación*, 3(26), 17–23. <https://doi.org/10.29018/issn.2588-1000vol3iss26.2019pp17-23>
- Jiménez, & Zambrano, M. L. (2011). Cuantificación de cobre en polifenoloxidasas de frutas tropicales por espectrofotometría de absorción atómica. *Informacion Tecnologica*, 22(2), 15–22. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642011000200003>

- Jiménez, J., Amores, F., & Nicklin, C. (2017). *Micro fermentación*. file:///C:/Users/Usuario_Cx/Downloads/Boletín técnico N° 140.PDF
- Krähmer, A., Engel, A., Kadow, D., Ali, N., Umaharan, P., Kroh, L. W., & Schulz, H. (2015). Fast and neat – Determination of biochemical quality parameters in cocoa using near infrared spectroscopy. *Food Chemistry*, 181, 152–159. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.02.084>
- Lagunes, L. C., Ramírez, M., Ortiz García, C. F., & Gutiérrez, O. A. (2018). VARIACIÓN MORFOLÓGICA DE FRUTOS Y SEMILLAS DE CACAO (*Theobroma cacao* L.) DE PLANTACIONES EN TABASCO, MÉXICO. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 41(2), 117–125. <https://doi.org/10.35196/rfm.2018.2.117-125>
- Larez, M., Álvarez, C., & Pérez, E. (2014). *Caracterización física y química de almendras de cacao fermentadas, secas y tostadas cultivadas en la región de Cuyagua, estado Aragua* PHYSICAL-CHEMICAL CHARACTERIZATION OF FERMENTED,. January 2007.
- Lopez, A., Hoyos, J., & Coronado, E. (2020). ARTICULO CIENTIFICO DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE CADMIO (Cd) EN ALMENDRAS DE CACAO (*Theobroma cacao* L) CULTIVADO BAJO TRES SISTEMAS DE MANEJO EN SAN ALEJANDRO-REGION UCAYALI. *Ecología*, 1–11.
- López, M. (2019). *Potencial de bacterias aisladas de fermento de cacao para remoción de cadmio y arsénico*. Universidad Nacional de Colombia.
- Martínez, A., & Cayón, D. (2012). Dinámica del Crecimiento y Desarrollo del Banano (*Musa* AAA Simmonds cvs. Gran Enano y Valery) Dynamics of Growth and Development of Banana (*Musa* AAA Simmonds cvs. Gran Enano and Valery). *Rev.Fac.Nal.Agr.Medellín*, 64(2), 6055–6064.
- Massoud, R., Khosravi, K., Sharifan, A., Asadi, G., & Zoghi, A. (2020). Biosorción de plomo y cadmio de la leche por *Lactobacillus acidophilus* ATCC 4356. *Food Science and Nutrition*, 8(10), 5284–5291. <https://doi.org/10.1002/fsn3.1825>
- Mclaughlin, M., Rodríguez, N., & Pennock, D. (2019). La contaminación del suelo: Una realidad oculta. In L. Pennock, M. Sala, I. Verbeke, & G. Stanco (Eds.), *Organizacion de las Naciones Unidas para la alimentacion y la agricultura* FAO (1st ed.). FAO.
- Medina, D. (2020). *Modificación bioquímica delcotiledón de cacao (*Theobroma cacao* L) en la etapa de postcosecha con la adición de levadura (*saccharomyces cerevisiae*) y enzima (polifenol oxidasa) para mejorar su calidad*.
- Medina, D., & Rojas, L. (2020). *Modificación bioquímica delcotiledón de cacao (*Theobroma cacao* L) en la etapa de postcosecha con la adición de levadura (*saccharomyces cerevisiae*) y enzima (polifenol oxidasa) para mejorar su calidad*. Universidad Técnica Estatal de Quevedo.
- Méndez. (2015). El cultivo del cacao venezolano a partir de Maruma. *Historia Caribe*, 10(27), 69–101. <https://doi.org/10.15648/hc.27.2015.3>

- Mite, F., Carrillo, M., & Durando, W. (2010). Avances del monitoreo de presencia de cadmio en almendras de cacao, suelos y aguas de Ecuador. *Xii Congreso Ecuatoriano de La Ciencia Del Suelo, November*, 17–19.
- Moore, R. E. T., Ullah, I., Oliveira, V. H. De, 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*. <https://doi.org/10.1038/s41438-020-0292-6>
- Morales, W., Vallejo, C., Sinche, P., Torres, Y., Vera, J., & Anzules, E. (2012). Mejoramiento de las características físico-químicas y sensoriales del cacao CCN51 a través de la adición de una enzima y levadura durante el proceso de fermentación. *Revista Amazónica Ciencia y Tecnología*, 5(2), 169–181.
- Morante, J., Agnieszka Obrebska, A., Nieto Rodríguez, J. E., Carranza Patiño, M. S., Pico-Saltos, R., & Bru-Martínez, R. (2014). Distribución, Localización E Inhibidores De Las Polifenol Oxidasas En Frutos Y Vegetales Usados Como Alimento. *Ciencia y Tecnología*, 7(1), 23–31. <https://doi.org/10.18779/cyt.v7i1.95>
- Moreiras, O., Carbajal, Á., Cabrera, L., & Cuadrado, C. (2013). *Manzana*. 275–276. <https://fen.org.es/MercadoAlimentosFEN/pdfs/manzana.pdf>
- Morejon, R., Vera, J., Salgado, I., Flores, C., & Morejon, M. (2022). USE OF ENZYMES AND LEAVENING AGENTS AS A STRATEGY TO REDUCE THE PRESENCE OF CADMIUM IN THE FERMENTATION PROCESS OF *Theobroma cacao* L . ALMONDS. *Journal of Pharmaceutical Negative Results*, 13(3), 604–614. <https://doi.org/10.47750/pnr.2022.13.03.089>
- Mundaca, G. (2016). Análisis de la calidad del grano de cacao mediante imágenes hiperespectrales usando técnicas de visión artificial. In *Repositorios Universidad de Piura*. Universidad de Piura.
- Navia, A., & Pazmiño, N. (2012). “*Mejoramiento de las Características Sensoriales del Cacao CCN51 a través de la Adición de Enzimas durante el Proceso de Fermentación.*”
- Neira, J. A., Revilla Escobar, K. Y., Aldas Morejon, J. P., & Sánchez Llaguno, S. N. (2020). Métodos de fermentación del cacao nacional (*theobroma cacao*) y su influencia en las características físico-químicas, contenido de cadmio y perfiles sensoriales. *Alternativas*, 21(3), 42–48. <https://doi.org/10.23878/alternativas.v21i3.339>
- Noor, J., & Nazamid, N. (2012). Original article Effect of polyphenol and pH on cocoa Maillard-related flavour precursors in a lipidic model system. *168 International Journal of Food Science and Technology*, 1(44), 168–180. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2008.01711.x>
- Núñez, J. C., López, PilarSoledad, M., Gómez, H., Denis, M., & Tovar, L. (2019). Physicochemical and microbiological dynamics of the fermentation of the CCN51 cocoa material in three maturity stages de material de cacau CCN51 em três fases de maturidade. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 41(3), 13.

- <http://dx.doi.org/10.1590/0100-29452019010>
- Orellana, L. D. M., Sánchez, G., & Cruz. (2006). Técnicas de recolección de datos en entornos virtuales más usadas en la investigación cualitativa. *Revista de Investigación Educativa, RIE*, 24(1), 205–222.
- Orozco, L., López, M., & Jaimez, R. (2021). CADMIO EN EL CULTIVO DE CACAO. *Ministerio de Agricultura y Ganadería*, 1(1), 26. <https://balcon.mag.gob.ec/mag01/magapaldia/CajadeHerramientasCadmioCacao/Guia1.pdf>
- Ortiz, K., & Álvarez, R. (2015). efecto del Vertimiento de subproductos del beneficio de cacao (*Theobroma cacao* L.) sobre algunas propiedades Químicas Y Biológicas en los suelos de una finca cacaotera, municipio de Yaguará (Huila, Colombia). *Bol.Cient.Mus.Hist.Nat.*, 19(1), 65–84. <https://doi.org/10.17151/bccm.2015.19.1.5>
- Ortíz, K., & Guilcapi, M. (2020). Manual de procesos de centro de acopio de cacao. *Pro Amazonía*, 1(1), 52.
- Pacheco, H. (2018). Agrociencias, investigación y sostenibilidad. In *Agrociencias, investigación y sostenibilidad* (p. 19).
- Pallares, A., Estupiñán, M., Perez Villamil, J. A., & López Giraldo, L. J. (2016). Impacto de la fermentación y secado sobre el contenido de polifenoles y capacidad antioxidante del clon de cacao CCN-51. *Revista ION*, 29(2), 7–21. <https://doi.org/10.18273/revion.v29n2-2016001>
- Paredes, N., Monteros, Á., Lima, L., Caicedo, C., Tinoco, L., Fernández, F., Vargas, Y., Pico, J., Subía, C., Burbano, A., Chanaluz, A., Sotomayor, D., Díaz, A., Intriago, J., Chancosa, C., Andrade, A., & Enriquez, G. (2022). *Manual del cultivo de cacao sostenible para la amazonía Ecuatoriana* (L. Tinoco (ed.); 1st ed.). INIAP. <https://repositorio.iniap.gob.ec/handle/41000/5833>
- Pargon, M. (2021). *Perfiles de fermentación para contribuir con el mejoramiento de la calidad del cacao (Theobroma cacao L.) y con el desarrollo socioeconómico de la ecorregión de Lachuá, Coban, Alta...* (Issue 237). <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.35109.93925/4>
- Pastás, K., Cacuango, L., & Vasco, E. (2021). Selección del laboratorio más idóneo para el análisis de cadmio. *Ministerio de Agricultura y Ganadería*, 1, 1–22. <https://cefaecuador.org/wp-content/uploads/2022/05/Guia5.pdf>
- Peláez, M.-J., Bustamante Cano, J.-J., & Gómez López, E.-D. (2016). Presencia de cadmio y plomo en suelos y su bioacumulación en tejidos vegetales en especies de *Brachiaria* en el Magdalena medio Colombiano. *Luna Azul*, 43(43), 82–101. <https://doi.org/10.17151/luaz.2016.43.5>
- Peñalba, A., Vanesa, E., & Cedeño, G. (2022). DEL CACAO EN PANAMÁ CHARACTERIZATION OF THE COCOA SUPPLY CHARACTERIZATION OF THE COCOA SUPPLY CHAIN IN PANAMA. *Multidisciplinary Research*, 2(16), 79–93. <https://revistas.glu.ac.pa/index.php/latitude/article/view/197/154>

- Perea, J., Cadena, T., & Herrera, J. (2019). Artículos Originales El cacao y sus productos como fuente de antioxidantes. *Revista de La Universidad Industrial de Santander*, 41(2), 128–134.
- Piedra, F. (2017). Control de pardeamiento enzimático en manzanas cortadas (Red delicious) mediante un sistema de evansado activo. *Enfoque UTE*, 8(2), 66–77. <https://doi.org/https://doi.org/10.29019/enfoqueute.v8n2.158>
- Poma, E., & Quezada, J. (2022). *Diseño de un modelo de cadena de valor para los agronegocios en la provincia de El Oro Design of a value chain model for agribusiness in the province of El Oro*. 228–240.
- Priambodo, D., Saputro, D., Pahlawan, M., Saputro, A., & Masithoh. (2022). Determination of Acid Level (pH) and Moisture Content of Cocoa Beans at Various Fermentation Level Using Visible Near-Infrared (Vis-NIR) Spectroscopy. *4th International Conference on Sustainable Agriculture*, 0–7. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/985/1/012045>
- Pshenichnyuk, S. A., Modelli, A., Lazneva, E. F., & Komolov, A. S. (2016). Hypothesis for the Mechanism of Ascorbic Acid Activity in Living Cells Related to Its Electron-Accepting Properties. *Journal of Physical Chemistry A*, 120(17), 2667–2676. <https://doi.org/10.1021/acs.jpca.6b02272>
- Pulido, P. M. (2015). Ceremonial y protocolo: métodos y técnicas de investigación científica. *Opción*, 31(1), 1137–1156.
- Quevedo, J. N., Romero Lopez, J. A., & Tuz Guncay, I. G. (2018). Calidad fisico quimico y sensorial de granos y licor de cacao (Theobroma cacao L.) usando cinco metodos de fermentacion. *Revista Científica Agrosistemas*, 6(May), 115, 127.
- Quezada, L., Quevedo, J., & García, R. (2017). Determinación del efecto del grado de madurez de las mazorcas en la producción y la calidad sensorial de (Theobroma cacao L.). *Revista Científica Agroecosistemas*, 5(1), 36–46. <https://aes.ucf.edu.cu/index.php/aes/article/view/139>
- Quintana, L., Gómez, S., García, A., & Martínez, N. (2015). Caracterización de tres índices de cosecha de cacao de los clones CCN51, ICS60 e ICS 95, en la montaña de satandereana, Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 6(1), 253–266.
- Quintero, M. L., & Morales, K. (2004). El mercado mundial del cacao. *Agroalimentaria*, 9(18), 47–59. http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1316-03542004000100004&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- Ramos, C. (2015). Los paradigmas de la investigación científica. *Avances En Psicología: Revista de La Facultad de Psicología y Humanidades / Artículos*, 23(1), 9–17. <https://doi.org/10.33539/avpsicol.2015.v23n1.167>
- Reyes, Y. C., Vergara, I., Torres, O. E., Díaz, M., & González, E. E. (2016). Contaminación por metales Pesados: implicaciones en salud, ambiente y seguridad alimentaria. *Ingeniería Investigación y Desarrollo*, 16(2), 66–77. <https://doi.org/10.19053/1900771x.v16.n2.2016.5447>

- Ríos, E., Lairón-Peris, M., Muñiz-Calvo, S., Heras, J. M., Ortiz-Julien, A., Poirot, P., Rozès, N., Querol, A., & Guillamón, J. M. (2021). Thermo-adaptive evolution to generate improved *Saccharomyces cerevisiae* strains for cocoa pulp fermentations. *International Journal of Food Microbiology*, 342, 109077. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2021.109077>
- Rivera, R., Mecías, F., Guzmán, Á., Peña, M., Medina, H., Casanova, L., Barrera, A., & Nivelá, P. (2012). Efecto del tipo y tiempo de fermentación en la calidad física y química del cacao (*Theobroma cacao* L.) tipo Nacional. *Ciencia y Tecnología*, 5(1), 7–12. <https://doi.org/https://doi.org/10.18779/cyt.v5i1.120>
- Rodríguez, J. A., & Pérez, A. O. (2017). Métodos científicos de indagación y de construcción del conocimiento. *Revista Escuela de Administración de Negocios*, 82, 1–27. <https://doi.org/https://doi.org/10.21158/01208160.n82.2017.1647>
- Rodríguez, L., Guevara, F., Ovando, J., Marto, J., & Ortiz, R. (2016). Crecimiento e índice de cosecha de variedades locales de maíz (*Zea mays* L.) en comunidades de la región Frailesca de Chiapas, México. *Cultivos Tropicales*, 37(3), 137–145. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1404.6967>
- Rodríguez, Rodríguez, E., Torres, L., Montenegro, A., & Pichimata, M. (2022). Development of validation methods to determine cadmium in cocoa almond from the beans by ICP-MS and ICP-OES. *Talanta Open*, 5, 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.talo.2021.100078>
- Rofner, N. F. (2022). Review on maximum limits of cadmium in cocoa (*Theobroma cacao* L.). *Granja*, 34(2), 113–126. <https://doi.org/10.17163/LGR.N34.2021.08>
- Rojas, K., Hernández, C., & Mencía, A. (2020). Transformaciones bioquímicas del cacao (*Theobroma cacao* L.) durante un proceso de fermentación controlada. *Agronomía Costarricense*, 45(1), 53–65. <https://doi.org/10.15517/rac.v45i1.45694>
- Rojas, K., Hernández, C., & Mencía-guevara, A. (2021). Transformaciones bioquímicas del cacao (*Theobroma cacao* L.) durante un proceso de fermentación controlada Biochemical transformations of cocoa (theobroma cacao L.) during a controlled fermentation process. *Agronomía Costarricense*, 45, 53–65. <https://doi.org/https://doi.org/10.15517/rac.v45i1.45694>
- Ruiz, M., Mera, O., Prado, Á., & Cedeño, W. (2014). INFLUENCIA DE LA ÉPOCA DE COSECHA EN LA CALIDAD DEL LICOR DE CACAO. *EspamCencia*, 5(2), 79–87.
- Salous, A. El. (2019). Acceleration of cocoa fermentation through the action of bacteria (*Acetobacter aceti*) and yeast. *Espirales*, 3(28), 1–20.
- Sanchez, C., & Mestanza, C. (2019). Evaluation of the Cocoa Bean (*Theobroma Cacao* L .), using Two Fermentators , Orellana and Sucumbios Provinces , Ecuador. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 8(7), 278–283.
- Sánchez, Pérez-Pazos, J. V., Luna Castellanos, L. L., García Peña, J. A., &

- Espitia Montes, A. A. (2019). Azotobacter chroococcum and Azospirillum lipoferum as biostimulants in Ipomoea batatas Lam. culture. *Agronomy Mesoamerican*, 30(2), 563–576. <https://doi.org/10.15517/am.v30i2.33896>
- Sánchez, Zambrano, J., Vera, J., Ramos, R., Gárce, F., & Vásconez, G. (2014). Productividad de clones de cacao tipo Nacional en una zona del bosque húmedo tropical de la Provincia de Los Ríos, Ecuador. *Ciencia y Tecnología UTEQ*, 7(1), 33–41.
- Sánchez. (2017). *Manual Técnico del Cultivo de Cacao Prácticas Latinoamericanas*.
<file:///C:/Users/Usuario/Cx/Downloads/BVE17089191e.pdf>
- Sandoval, A., & Horta, H. (2021). Innovación tecnológica en cacao Andino. *Fontagro*, 1(1), 50.
- Santander, W., Garay, R., Verde, C., & Mendieta, O. (2021). Determinación del contenido de cadmio en suelos, frutos, granos fermentados y secos, licor de cacao y chocolate en zonas productoras de la Región San Martín. *Revista de La Sociedad Química Del Perú*, 87(1), 39–49. <https://doi.org/10.37761/rsqp.v87i1.321>
- Santurino, C., Fernández, E., López, B., & Gómez, C. (2022). Composición nutricional y declaraciones nutricionales del plátano de Canarias Nutritional composition and nutritional claims of Canary Islands banana Edwin. *Nutrición Hospitalaria*, 38(6), 1248–1256.
- Saza, J., & Jiménez, F. (2020). Determinación de condiciones ambientales para la conservación de granos de cacao (Theobroma cacao L) deshidratado durante el almacenamiento. *Sistemas De Producción Agroecológicos*, 11(1), 97–125. <https://doi.org/https://doi.org/10.22579/22484817.461>
- Shilthon, C., Florida, N., & Gómez, R. (2018). EL pH Y LA ABSORCIÓN DE CADMIO EN ALMENDRAS DE CACAO ORGÁNICO (Theobroma cacao L .) EN LEONCIO PRADO , THE pH AND ABSORPTION OF CADMIUM IN ALMONDS OF ORGANIC COCOA (Theobroma cacao L .), IN LEONCIO PRADO ,. *Folia Amazónica*, 27(1), 1–8. <https://doi.org/https://doi.org/10.24841/fa.v27i1.458>
- Tamay de Dios, L., Ibarra, C., & Velasquillo, C. (2013). Fundamentos de la reacción en cadena de la polimerasa (PCR) y de la PCR en tiempo real. *Tecnología En Salud*, 2(2), 70–78. <https://www.medigraphic.com/pdfs/invdiss/ir-2013/ir132d.pdf>
- Urley, A., Pérez, M., Gómez, M. R., Paola, D., Ordoñez, S., María, A., Rolón, P., Alexander, W., Ortiz, W., Ramírez, L., & Rengifo, A. (2019). Hongos formadores de micorrizas arbusculares (HFMA) como estrategia para reducir la absorción de cadmio en plantas de cacao (Theobroma cacao) Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) as a strategy to reuce the absorption of cadmium in cocoa (Theobroma c. 121–130. <https://www.terralatinoamericana.org.mx/index.php/terra/article/view/479/549>
- Valenzuela, R., Salazar, E., Aguilar, M., Aranda, N., Sotelo, A., & Chire, G.

- (2020). Physicochemical properties and microbial group behavior of postharvest peruvian cocoa bean (*Theobroma cacao* L.). *Enfoque UTE*, V.11-N.4, 11(4), 48–56. <https://doi.org/10.29019/enfoque.v11n4.602>
- Vallejo, Loayza, G., Morales, W., & Vera, J. (2018). Perfil sensorial de genotipos de cacao (*Theobroma cacao* L.) en la parroquia Valle Hermoso- Ecuador. *Revista ESPAMCIENCIA*, 9(2), 103–113.
- Vallejo, M., Gurri, F., & Molina, D. (2011). Agricultura comercial, tradicional y vulnerabilidad en campesinos. *Política y Cultura*, 36, 71–98.
- Vallejo, Vera, J., Párraga, M., Morales, W., Macías, J., & Ramos, R. (2015). Atributos físicos-químicos y sensoriales de las almendras de quince clones de Cacao Nacional (*Theobroma cacao* L.) en el Ecuador. *Ciencia y Tecnología*, 7(2), 21–34. <https://doi.org/10.18779/cyt.v7i2.139>
- Vasquez, L., Vera, J., Erazo, C., & Intriago, F. (2022). Induction of rhizobium japonicum in the fermentative mass of two varieties of cacao (*Theobroma Cacao* L .) as a strategy for the decrease of cadmium. *International Journal of Health Sciences*, 6(3), 18. <https://doi.org/http://doi.org/10.53730/ijhs.v6nS3.8672>
- Veintimilla, K., Vera, J., & Pérez, C. (2020). Multicriteria model for the selection and design of the drying process for cocoa beans Modelo Multicriterio para la Selección y Diseño de un Sistema de Secado de Cacao en Grano. *International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology Factor de Impacto*, 1(1), 0–9. <https://doi.org/10.18687/LACCEI2020.1.1.403>
- Vera, J., & Salazar, M. (2021). Aplicación de siete bioles sobre el desarrollo agronómico en cacao (*Theobroma cacao* L.) De origen sexual y asexual en etapa productiva en la finca experimental la represa. *Centrosur*, 1(1), 1–43.
- Vera, J., & Vera, J. F. (2018). *Resumen de principios de diseños experimentales* (G. Compás (ed.)).
- Vera, J., Vallejo, C., Párraga, D., Morales, W., Macías, J., & Ramos, R. (2014). Atributos físicos-químicos y sensoriales de las almendras de quince clones de cacao nacional (*Theobroma cacao* L.) en el Ecuador. *Ciencia y Tecnología*, 7(2), 21–34.
- Vera, Vallejo, C., Párraga, D. E., Macías, J., Ramos, R., & Morales, W. (2015). ATRIBUTOS FÍSICOS-QUÍMICOS Y SENSORIALES DE LAS ALMENDRAS DE QUINCE CLONES DE CACAO NACIONAL (*Theobroma cacao* L.) EN EL ECUADOR. *Ciencia y Tecnología*, 7(2), 21–34. <https://doi.org/10.18779/cyt.v7i2.99>
- Vera, Véliz, B., & Herrera, N. (2019). Calidad física de almendras en veintiún cruces interclonales de cacao (*Theobroma cacao* L.) en Ecuador. *Universidad y Sociedad*, 11(2), 402–408.
- Vera. (2016). *Guía Para El Mejoramiento De Cacao Nacional*. June 2016. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.12413.26089>
- Zúñiga, M. (2021). Cosechando cacao de calidad. *Ipalole*.

RESUMEN

El T. cacao como materia prima tiene su importancia económica y productiva en el Ecuador, la elaboración de derivados para su exportación deben cumplir con el reglamento de la Unión Europea 2021/1323 donde los límites de cadmio no deben ser superior de 0,80 mg Kg⁻¹, el objetivo de esta investigación fue evaluar el uso de microorganismos eficientes en la masa fermentativa de cacao añadiendo dos extractos de frutas (Banano y Manzana) 3% (60mL) en dos Provincias (Manabí y Esmeraldas), se utilizó dos tipos de microorganismos comerciales Albiobatch y COMERCIAL cuya aplicación represento el 20 % (400mL), y su incidencia en la disminución de cadmio, se utilizó un (DCA), Trifactorial 2*2*2 agregado+2, dos controles sin aplicación (1 Manabí y 2 Esmeraldas) con un arreglo de 10 tratamientos y 3 repeticiones, Se estableció en cajas microfermentadores tipo Rohán con capacidad de 2 kg por unidad muestral, se realizaron mediciones morfológicas del fruto (índice de mazorca, peso total, lago del lomo, ancho de cáscara, número de almendras por mazorca y peso de almendras), durante el proceso de fermentación se evaluó la temperatura, pH, °Brix, posterior a 4 días de fermentación se procedió al secado de las almendras de cacao al sol por un tiempo de 6 días hasta conseguir una media de la humedad entre 6 a 7%, para medir la calidad del grano se procedió por la prueba de corte según la norma INEN 176/2018, . Posteriormente por el método de cuarteo para cada tratamiento se obtuvo una muestra compacta de 1 Kg, para la medición de cadmio las almendras fueron sometidos a una digestión nítro perclórica siguiendo el método 3050B de USDAP y se determinaron utilizando espectrometría de absorción atómica con horno de grafito. Los resultados obtenidos por las variables estudiadas morfológicas del fruto en índice de mazorca fue 12,0g peso total 893,47g, largo del lomo 24,50cm, Ancho 9,67cm, cáscara 642,00cm, número de almendras 63, peso de Almendras 222,33g. La aplicación de microorganismos eficientes y extractos en la etapa fermentativa tuvo un efecto concluyente en base a la variable pH desde 3,15 - 5,69, mientras que en °Brix su comportamiento es lineal decreciente iniciando en 19,23 – 5,48, en la variable temperatura inicialmente fue de 32 - 48,67°C, además se valoró índice de semilla, %testa y cotiledón, prueba de corte mostro que al inducir COMERCIAL + Banano en Manabí tuvo 93.33 % de granos fermentados disminuyendo la cantidad de granos violetas, granos mohosos y eliminando la presencia de granos pizarras. El uso de Albiobatch y COMERCIAL durante la fermentación de cacao es una estrategia importante que permitió una disminución de cadmio en las almendras de cacao para la provincia de Esmeraldas de 63% y Manabí 58% respectivamente.

Palabras Clave: Fermentación, Provincias, micro – fermentación, mazorca, almendra.

Abstract

The T. cocoa as a raw material has its economic and productive importance in Ecuador, the elaboration of derivatives for export must comply with the regulation of the European Union 2021/1323 where cadmium limits should not exceed 0,80 mg Kg⁻¹, the objective of this research was evaluate the use of efficient microorganisms in the fermentative mass of cocoa by adding two fruit extracts (Banana and Apple) 3% (60mL) in two Provinces (Manabí and Esmeraldas), two types of commercial microorganisms Albiobatch and COMERCIAL were used whose application represented 20% (400 mL), and its incidence in the reduction of cadmium, a (DCA) was used, Trifactorial 2 * 2 * 2 aggregate + 2, two controls without application (1 Manabí and 2 Esmeraldas) with an arrangement of 10 treatments and 3 repetitions, It was established in boxes microfermentadores type Rohán with capacity of 2 kg per sample unit, morphological measurements of the fruit were made (cob index, total weight, loin lake, shell width, number of almonds per ear and weight of almonds), during the fermentation process the temperature, pH, °Brix were evaluated, after 4 days of fermentation the cocoa almonds were dried in the sun for a time of 6 days until an average humidity between 6 to 7% was achieved, to measure the quality of the grain we proceeded by the cutting test according to the INEN 176/2018. Subsequently, by the quartering method for each treatment, a compact sample of 1 kg was obtained, for the measurement of cadmium the almonds were subjected to a perchloric nitro digestion following the USDAP method 3050B and were determined using atomic absorption spectrometry with graphite furnace. The results obtained by the variables studied morphological of the fruit in index of mazorca was 12,0g total weight 893,47g, length of the loin 24,50cm, width 9,67cm, cáscara 642,00cm, number of almondss 63, weight of almonds 222,33g. The application of efficient microorganisms and extracts in the fermentation stage had a conclusive effect based on the variable pH from 3,15 – 5,69, while in °Brix its behavior is linear decreasing starting at 19,23 - 5,48, in the variable temperature initially was 32 – 48,67 ° C, in addition index of seed, %testa and cotiledon, cutting test showed that by inducing COMERCIAL + Banana in Manabí had 93.33% of fermented grains decreasing the amount of violet grains, moldy grains and eliminating the presence of slate grains. The use of Albiobatch and COMERCIAL during cocoa fermentation is an important strategy that allowed a decrease of cadmium in cocoa almonds for the province of Esmeraldas of 63% and Manabí 58% respectively.

Keywords: Fermentation, Provinces, micro-fermentation, cob, almond



<http://www.editorialgrupo-aea.com>



[Editorial Grupo AeA](#)



[editorialgrupoea](#)



[Editorial Grupo AEA](#)