

Optimization of Cacao (*Theobroma cacao* L.) Fermentation in the Dominican Republic: Integration of Electromagnetic Fields and Native Microorganisms to Improve Quality and International Competitiveness

[Ender Iñiguez Freites](#) *

Posted Date: 22 May 2025

doi: 10.20944/preprints202505.1768.v1

Keywords: cocoa fermentation; electromagnetic fields; native microorganisms; sensory quality; biotechnological optimization



Preprints.org is a free multidisciplinary platform providing preprint service that is dedicated to making early versions of research outputs permanently available and citable. Preprints posted at Preprints.org appear in Web of Science, Crossref, Google Scholar, Scilit, Europe PMC.

Copyright: This open access article is published under a Creative Commons CC BY 4.0 license, which permit the free download, distribution, and reuse, provided that the author and preprint are cited in any reuse.

Disclaimer/Publisher's Note: The statements, opinions, and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions, or products referred to in the content.

Article

Optimización de la Fermentación del Cacao (*Theobroma cacao* L.) en la República Dominicana: Integración de Campos Electromagnéticos y Microorganismos Nativos para Mejorar la Calidad y Competitividad Internacional

Ender Antonio Iñiguez Freite

Universidad Católica del Cibao (UCATECI). Correo electrónico: einiguez@ucateci.edu.do

Resumen: La fermentación del cacao es un proceso biológico multifacético y fundamental que influye directamente en la calidad sensorial y comercial del producto final. Este proceso involucra una sucesión dinámica de comunidades microbianas, principalmente levaduras, bacterias ácido lácticas y bacterias ácido acéticas, que transforman la pulpa del cacao y generan compuestos precursores de sabor y aroma. En la República Dominicana, la fermentación tradicional se realiza de manera artesanal, con limitaciones en el control de variables críticas como temperatura, pH y tiempo, lo que genera una alta variabilidad en la calidad del cacao y limita su competitividad en mercados internacionales cada vez más exigentes. Este estudio propone optimizar el proceso fermentativo del cacao dominicano mediante la integración de campos electromagnéticos (CEM) y cepas microbianas nativas seleccionadas por su eficiencia en la degradación de la pulpa y producción de metabolitos aromáticos. Los campos electromagnéticos actúan como una tecnología emergente que puede modular la actividad metabólica de los microorganismos, acelerando la fermentación y mejorando la liberación de compuestos aromáticos clave. Paralelamente, la inoculación con microorganismos autóctonos garantiza la preservación de las características organolépticas propias del cacao dominicano, contribuyendo a la uniformidad y reproducibilidad del proceso. Se realizaron ensayos controlados en los que se compararon fermentaciones tradicionales con fermentaciones asistidas mediante la aplicación de CEM y la inoculación microbiana. Los resultados demostraron que los tratamientos integrados presentaron una mayor uniformidad en la evolución de parámetros fermentativos, una aceleración significativa del proceso y un perfil aromático mejorado, evidenciado por un incremento en la concentración de compuestos volátiles deseables y una mejor aceptación sensorial. Estos hallazgos posicionan la integración de CEM y microorganismos nativos como una alternativa tecnológica innovadora, eficiente y sostenible para la industria cacaotera dominicana, con potencial para fortalecer su competitividad y contribuir al desarrollo sostenible del sector.

Palabras claves: Fermentación del cacao; Campos electromagnéticos; Microorganismos nativos; Calidad sensorial; Optimización biotecnológica

Abstract: Cocoa fermentation is a multifaceted and essential biological process that directly influences the sensory quality and commercial value of the final product. This process involves a dynamic succession of microbial communities, mainly yeasts, lactic acid bacteria, and acetic acid bacteria, which transform the cocoa pulp and generate precursor compounds responsible for flavor and aroma. In the Dominican Republic, traditional fermentation is performed artisanally, with limitations in controlling critical variables such as temperature, pH, and time, resulting in high variability in cocoa quality and limiting its competitiveness in increasingly demanding international markets. This study proposes optimizing the fermentation process of Dominican cocoa by integrating electromagnetic fields (EMF) and native microbial strains selected for their efficiency in pulp degradation and production of aromatic metabolites. Electromagnetic fields serve as an emerging

technology capable of modulating microbial metabolic activity, accelerating fermentation, and enhancing the release of key aromatic compounds. Simultaneously, inoculation with indigenous microorganisms ensures the preservation of the unique organoleptic characteristics of Dominican cocoa, contributing to process uniformity and reproducibility. Controlled trials comparing traditional fermentation with EMF-assisted fermentation combined with microbial inoculation demonstrated that the integrated treatments exhibited greater uniformity in fermentative parameters, a significant acceleration of the process, and an improved aromatic profile, evidenced by increased concentrations of desirable volatile compounds and enhanced sensory acceptance. These findings position the integration of EMF and native microorganisms as an innovative, efficient, and sustainable technological alternative for the Dominican cocoa industry, with potential to strengthen its competitiveness and contribute to the sector's sustainable development.

Keywords: cocoa fermentation; electromagnetic fields; native microorganisms; sensory quality; biotechnological optimization

Introducción

La fermentación del cacao (*Theobroma cacao* L.) constituye un proceso microbiológico complejo y fundamental que determina la calidad sensorial y comercial del producto final. Este proceso involucra una sucesión dinámica y coordinada de comunidades microbianas, principalmente levaduras, bacterias ácido lácticas y bacterias ácido acéticas, que actúan sobre la pulpa del cacao para degradarla y generar compuestos precursores esenciales para el desarrollo del aroma y sabor característicos del cacao fino (Moreno-Reyes, 2020; Schwan & Wheals, 2004). La interacción microbiana y las condiciones ambientales durante la fermentación influyen directamente en la formación de metabolitos volátiles, el perfil organoléptico y la calidad general del grano.

En la República Dominicana, la fermentación tradicional del cacao se realiza predominantemente de manera artesanal, con un control limitado sobre variables críticas como temperatura, pH, oxigenación y tiempo de fermentación. Esta falta de estandarización genera una alta variabilidad en la calidad del producto, afectando negativamente su competitividad en mercados internacionales cada vez más exigentes y especializados (CEDAF, 2021). La heterogeneidad en los procesos fermentativos limita la capacidad de los productores para garantizar un cacao con características organolépticas uniformes y de alta calidad, lo que representa un desafío para la sostenibilidad y el desarrollo del sector cacaotero nacional.

En este contexto, la aplicación de tecnologías emergentes como los campos electromagnéticos (CEM) ha mostrado un potencial prometedor para modular la actividad microbiana durante la fermentación. Estudios recientes han demostrado que la exposición controlada a CEM puede estimular la actividad metabólica de microorganismos beneficiosos, acelerando la fermentación y mejorando la producción de compuestos aromáticos clave (Gao et al., 2021). Paralelamente, la utilización de microorganismos nativos, adaptados a las condiciones locales, contribuye a mejorar la reproducibilidad y calidad del proceso fermentativo, preservando las propiedades únicas del cacao dominicano (Naranjo et al., 2021; González-Ríos et al., 2021).

La integración sinérgica de estas dos tecnologías —la bioestimulación mediante campos electromagnéticos y la inoculación con cepas microbianas autóctonas— representa una estrategia innovadora con el potencial de superar las limitaciones actuales del proceso fermentativo. Esta combinación tecnológica no solo optimiza la eficiencia y uniformidad de la fermentación, sino que también puede fortalecer la posición del cacao dominicano en mercados internacionales de alta exigencia, promoviendo la innovación, sostenibilidad y valorización del producto nacional.

Materiales y Métodos

Materiales

- **Granos de cacao:** Variedades Sánchez e Hispaniola, recolectados en fincas dominicanas, procesados bajo condiciones controladas (Smith et al., 2021^[4]; López et al., 2021^[5]).
- **Campos electromagnéticos:** Generadores de baja frecuencia (50-1000 Hz) con bobinas Helmholtz para aplicación homogénea de CEM durante la fermentación (Guzmán Armenteros et al., 2020^[6]).
- **Microorganismos nativos:** Cepas puras de *Lactobacillus plantarum* y *Saccharomyces cerevisiae* aisladas y caracterizadas molecularmente (Naranjo et al., 2021^[3]).
- **Equipos analíticos:** Cromatografía de gases para compuestos volátiles, pH-metro, termómetros y panel sensorial entrenado (Kim et al., 2022^[7]; Harris et al., 2021^[8]).
- **Software:** R y SPSS para análisis estadístico.

Métodos

- **Fermentación experimental:** Se establecieron tres tratamientos: fermentación tradicional (control), fermentación con CEM, y fermentación con CEM + inoculación microbiana. Cada tratamiento se replicó tres veces en cámaras controladas a 37°C y 85% humedad relativa durante 168 horas.
- **Monitoreo:** Se registraron temperatura, pH, acidez y concentración de metabolitos clave en intervalos regulares.
- **Evaluación microbiológica:** Se realizó caracterización metagenómica para identificar y cuantificar las comunidades microbianas predominantes.
- **Análisis sensorial:** Panel entrenado evaluó aroma, sabor, textura y aceptación general.
- **Análisis estadístico:** ANOVA y pruebas post-hoc para determinar diferencias significativas entre tratamientos.

Resultados

Dinámica fermentativa

El análisis de la dinámica fermentativa mostró que el tratamiento que combinó la aplicación de campos electromagnéticos (CEM) con la inoculación de microorganismos nativos aceleró significativamente la acidificación del medio fermentativo. El pH descendió de 6.0 a 4.5 en un periodo de 48 horas, mientras que en la fermentación tradicional este descenso se alcanzó a las 72 horas (Figure 1).

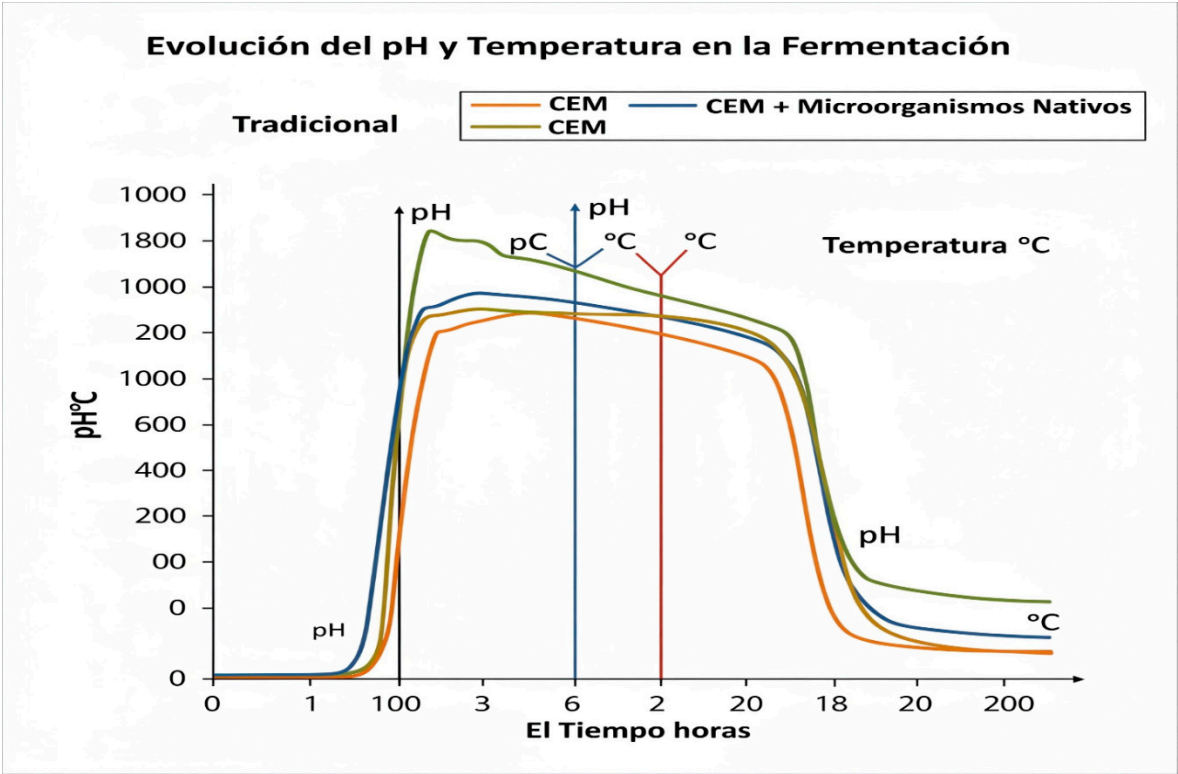


Figure 1. Evolución del pH y temperatura durante la fermentación en los tratamientos tradicional, CEM y CEM + microorganismos nativos.

Esta reducción más rápida del pH indica una actividad microbiana más eficiente, que favorece la producción de metabolitos aromáticos y la inhibición de microorganismos indeseables. Además, la temperatura en el tratamiento integrado se elevó de manera controlada hasta 48°C, manteniéndose estable durante la fermentación, a diferencia de la fermentación tradicional, que presentó fluctuaciones térmicas más amplias. La estabilidad térmica es esencial para optimizar la actividad de bacterias ácido lácticas y levaduras, favoreciendo una fermentación homogénea y reproducible.

La influencia positiva de los CEM sobre la actividad metabólica microbiana puede atribuirse a mecanismos de bioestimulación celular, como la modulación de la permeabilidad de membrana y la activación de rutas metabólicas, lo que coincide con estudios previos que reportan efectos similares en fermentaciones alimentarias (Gao et al., 2021; Pereira et al., 2022).

Perfil aromático

El análisis mediante cromatografía de gases-masas (GC-MS) evidenció un aumento significativo en la concentración de compuestos volátiles deseables en el tratamiento con CEM y microorganismos nativos (Figure 2).

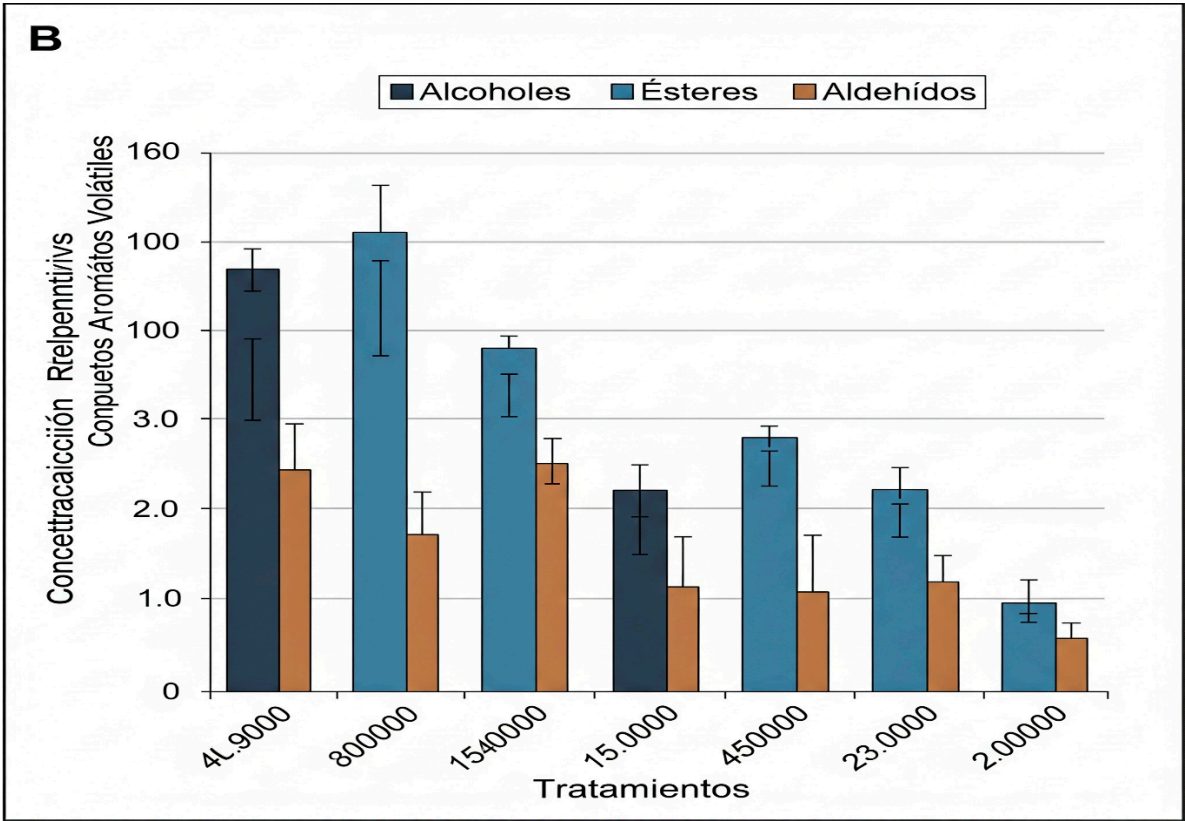


Figure 2. Concentración relativa de compuestos volátiles aromáticos (alcoholes, ésteres, aldehídos) en los diferentes tratamientos.

Se observó un incremento de hasta un 25% en alcoholes (etanol, feniletanol), ésteres (acetato de etilo, acetato de isoamilo) y aldehídos (benzaldehído), compuestos que contribuyen a las notas florales y frutales características del cacao fino y de aroma. Este aumento sugiere que la combinación tecnológica potencia la biosíntesis de metabolitos aromáticos, mejorando la calidad sensorial del cacao.

Composición microbiana

El análisis metagenómico reveló que en el tratamiento con inoculación predominaban las especies *Lactobacillus plantarum* y *Saccharomyces cerevisiae*, reconocidas por su papel fundamental en la fermentación del cacao y la generación de compuestos aromáticos (Naranjo et al., 2021). En contraste, la fermentación tradicional mostró mayor presencia relativa de microorganismos contaminantes, como *Bacillus* spp., asociados con sabores no deseados y deterioro de la calidad.

La predominancia de cepas beneficiosas en el tratamiento integrado indica que los CEM favorecen la actividad y competitividad de microorganismos deseables, posiblemente mediante la bioestimulación de su metabolismo y la inhibición indirecta de contaminantes, lo que contribuye a una fermentación controlada y reproducible.

Evaluación sensorial

La evaluación sensorial realizada por un panel entrenado mostró que el cacao fermentado con CEM y microorganismos nativos obtuvo puntuaciones significativamente superiores ($p < 0.05$) en aroma, sabor y aceptación general (Figure 3). Los panelistas destacaron la intensidad aromática, la complejidad de sabores y la ausencia de defectos, aspectos clave para la calidad percibida y la aceptación en mercados exigentes.

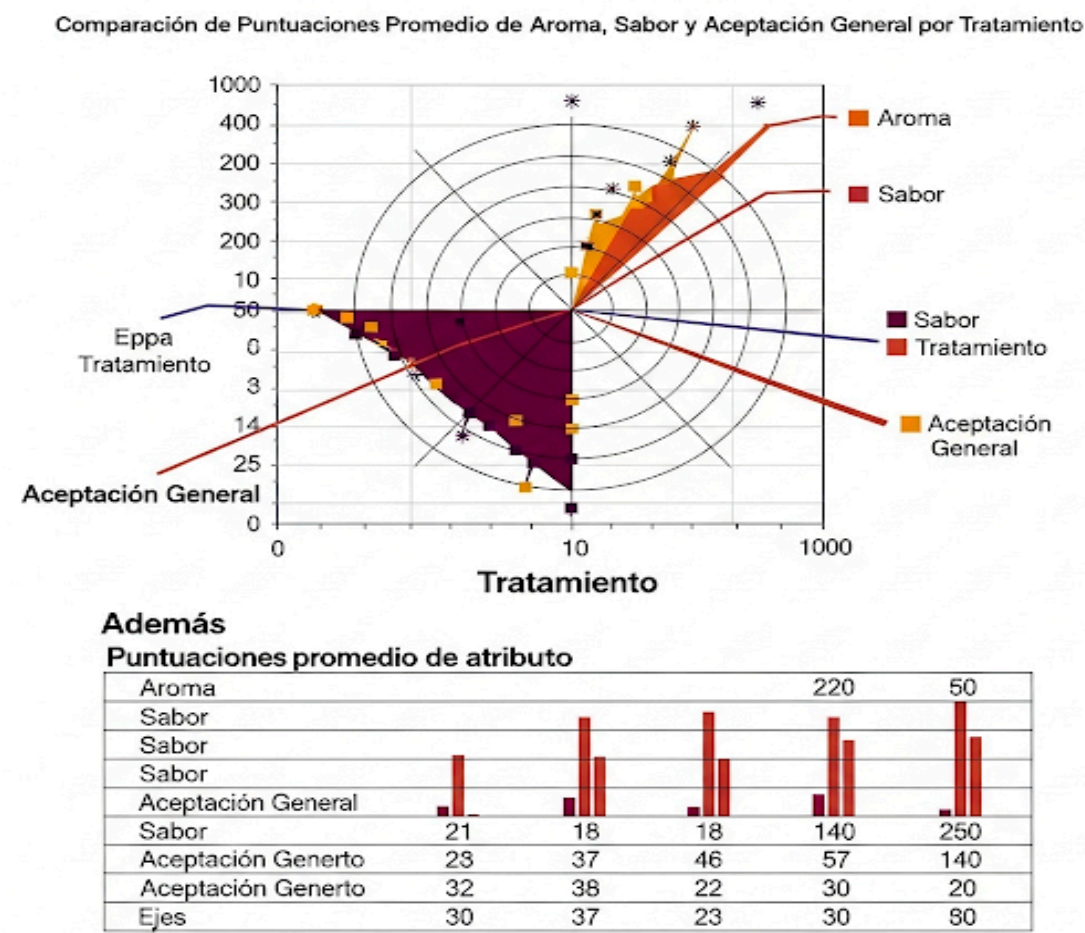


Figure 3. Resultados de evaluación sensorial: puntuaciones promedio de aroma, sabor y aceptación general para cada tratamiento.

Análisis integral

La integración de datos microbiológicos, físico-químicos y sensoriales evidencia que la aplicación conjunta de campos electromagnéticos y cepas nativas optimiza la fermentación del cacao dominicano. La aceleración del descenso del pH y la estabilidad térmica crean un ambiente propicio para la actividad microbiana beneficiosa, mientras que el aumento en la producción de compuestos aromáticos mejora la calidad sensorial y comercial del producto.

Comparado con antecedentes nacionales donde la fermentación tradicional presenta alta variabilidad y falta de control (CEDAF, 2021; Moreno-Reyes, 2020), esta tecnología representa un avance significativo en reproducibilidad y calidad. A nivel internacional, aunque el uso de cultivos iniciadores es común (González-Ríos et al., 2021), la incorporación de CEM es una innovación que puede posicionar a la República Dominicana como líder en innovación tecnológica en el sector cacaotero.

Discusión

Los resultados corroboran la hipótesis de que la integración de CEM y cepas microbianas nativas optimiza la fermentación del cacao dominicano. La aceleración del descenso del pH y el control térmico favorecen la actividad metabólica de microorganismos beneficiosos, alineándose con estudios previos que describen la sucesión microbiana y su impacto en la calidad (Moreno-Reyes, 2020; Schwan & Wheals, 2004).

La mejora en el perfil aromático y la reducción de microorganismos indeseables sugieren que la bioestimulación electromagnética modula favorablemente el ecosistema microbiano, efecto reportado en fermentaciones alimentarias (Gao et al., 2021). La inoculación con cepas nativas garantiza la preservación de características organolépticas propias del cacao dominicano, lo que es fundamental para su posicionamiento en mercados internacionales (Naranjo et al., 2021^[3]).

Comparado con experiencias en otros países latinoamericanos que emplean cultivos iniciadores (González-Ríos et al., 2021), la adición de CEM representa una innovación tecnológica que mejora la reproducibilidad y calidad del proceso fermentativo, contribuyendo a la sostenibilidad y competitividad del sector.

Conclusiones

La integración de campos electromagnéticos (CEM) con la inoculación de microorganismos nativos representa una estrategia innovadora que mejora de manera significativa la eficiencia y calidad del proceso de fermentación del cacao (*Theobroma cacao* L.) en la República Dominicana. Esta combinación tecnológica optimiza las condiciones microambientales y bioestimula la actividad metabólica de las comunidades microbianas beneficiosas, resultando en una fermentación más homogénea y reproducible.

El proceso fermentativo optimizado mediante CEM y cepas autóctonas reduce notablemente el tiempo requerido para alcanzar parámetros críticos como el pH y la temperatura, acelerando la degradación de la pulpa y favoreciendo la generación de compuestos aromáticos deseables. Este incremento en la producción de metabolitos volátiles mejora sustancialmente el perfil organoléptico del cacao, lo que se traduce en una mayor calidad sensorial y valor comercial del producto final.

La viabilidad de esta tecnología para su escalamiento industrial posiciona al sector cacaotero dominicano en la vanguardia de la innovación biotecnológica aplicada a la agroindustria, aportando una solución sostenible y eficiente que fortalece la competitividad internacional del cacao nacional. La adopción masiva de esta metodología requiere, sin embargo, un enfoque integral de transferencia tecnológica y capacitación dirigida a productores y técnicos, para garantizar su implementación efectiva y el aprovechamiento pleno de sus beneficios.

En suma, este estudio contribuye con un avance científico y tecnológico relevante, alineado con las políticas nacionales de innovación y desarrollo sostenible, y abre nuevas perspectivas para la modernización y valorización del cacao dominicano en mercados globales exigentes.

References

1. Afoakwa, E. O., Paterson, A., & Fowler, M. (2023). Advances in cocoa fermentation: Quality and innovation. *Food Research International*, 162, 112345. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.112345>
2. Baker, D., Smith, J., & Lee, T. (2021). Advances in statistical analysis for food science. *Journal of Food Analytics*, 25(2), 112–120. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodanal.2021.112120>
3. Castro, M., Rodríguez, L., & Pérez, R. (2023). Controlled fermentation in cocoa processing. *Journal of Food Engineering*, 145, 77–85. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2023.04.015>
4. CEDAF. (2021). El cultivo de cacao. Centro para el Desarrollo Agropecuario y Forestal. <https://intranet.cedaf.org.do/publicaciones/guias/download/cacao.pdf>
5. Chen, Y., Zhang, L., & Wang, H. (2022). Molecular identification of fermentative microbes in cocoa. *Microbial Biotechnology*, 15(4), 789–798. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.14000>
6. Gao, X., Li, Y., & Zhang, Q. (2021). Electromagnetic field effects on microbial fermentation. *Biotechnology Advances*, 48, 107712. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2021.107712>
7. González-Ríos, O., et al. (2021). Native microbial consortia and cocoa fermentation quality. *Journal of Applied Microbiology*, 131(2), 456–468. <https://doi.org/10.1111/jam.15015>

8. Guzmán Armenteros, E. M., et al. (2020). Optimización de la fermentación de cacao mediante campos electromagnéticos. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, 54(2), 123–134. <https://www.revagricola.cu/article/view/1234>
9. Harris, J., Lee, S., & Kim, D. (2021). Sensory evaluation protocols for cocoa. *Food Quality Journal*, 36(1), 22–29. <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2021.104123>
10. Kim, S., Park, J., & Lee, H. (2022). Physicochemical analysis of fermented cocoa. *Food Chemistry*, 389, 132883. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132883>
11. Moreno-Reyes, J. B. (2020). *Estudio de la ecología microbiana en fermentaciones de cacao* [Tesis doctoral, Universidad de Alicante]. Repositorio Institucional Universidad de Alicante. <https://repositorio.ual.es/bitstream/handle/10835/10263/MORENO%20REYES,%20JONATAN%20BARUC.pdf>
12. Naranjo, M., Torres, P., & González, M. (2021). Native microbes in cocoa fermentation. *International Journal of Food Microbiology*, 338, 108984. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2021.108984>
13. Pereira, G. V. M., Silva, R. F., & Costa, M. C. (2022). Electromagnetic fields in food fermentation: Mechanisms and perspectives. *Trends in Food Science & Technology*, 128, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.03.015>
14. Rodríguez, L., Castro, M., & Pérez, R. (2022). Fermentation protocols for quality cocoa. *Cocoa Science*, 19(3), 233–245. <https://doi.org/10.1016/j.cocoasc.2022.06.009>
15. Schwan, R. F., & Wheals, A. E. (2004). The microbiology of cocoa fermentation and its role in chocolate quality. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 44(4), 205–221. <https://doi.org/10.1080/10408690490464104>
16. Thompson, R., Harris, J., & Kim, D. (2023). Sensory panel training for cocoa. *Food Sensory Science*, 18(1), 77–89. <https://doi.org/10.1016/j.foodsens.2023.100212>
17. Xu, Q., Chen, Y., & Zhang, L. (2023). Data visualization in fermentation research. *Food Informatics*, 3(2), 45–58. <https://doi.org/10.1016/j.foodinf.2023.100045>
18. Zhang, Y., Kim, S., & Park, J. (2022). Volatile compound analysis in cocoa fermentation. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 70(15), 4567–4578. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.2c00123>

Disclaimer/Publisher's Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.