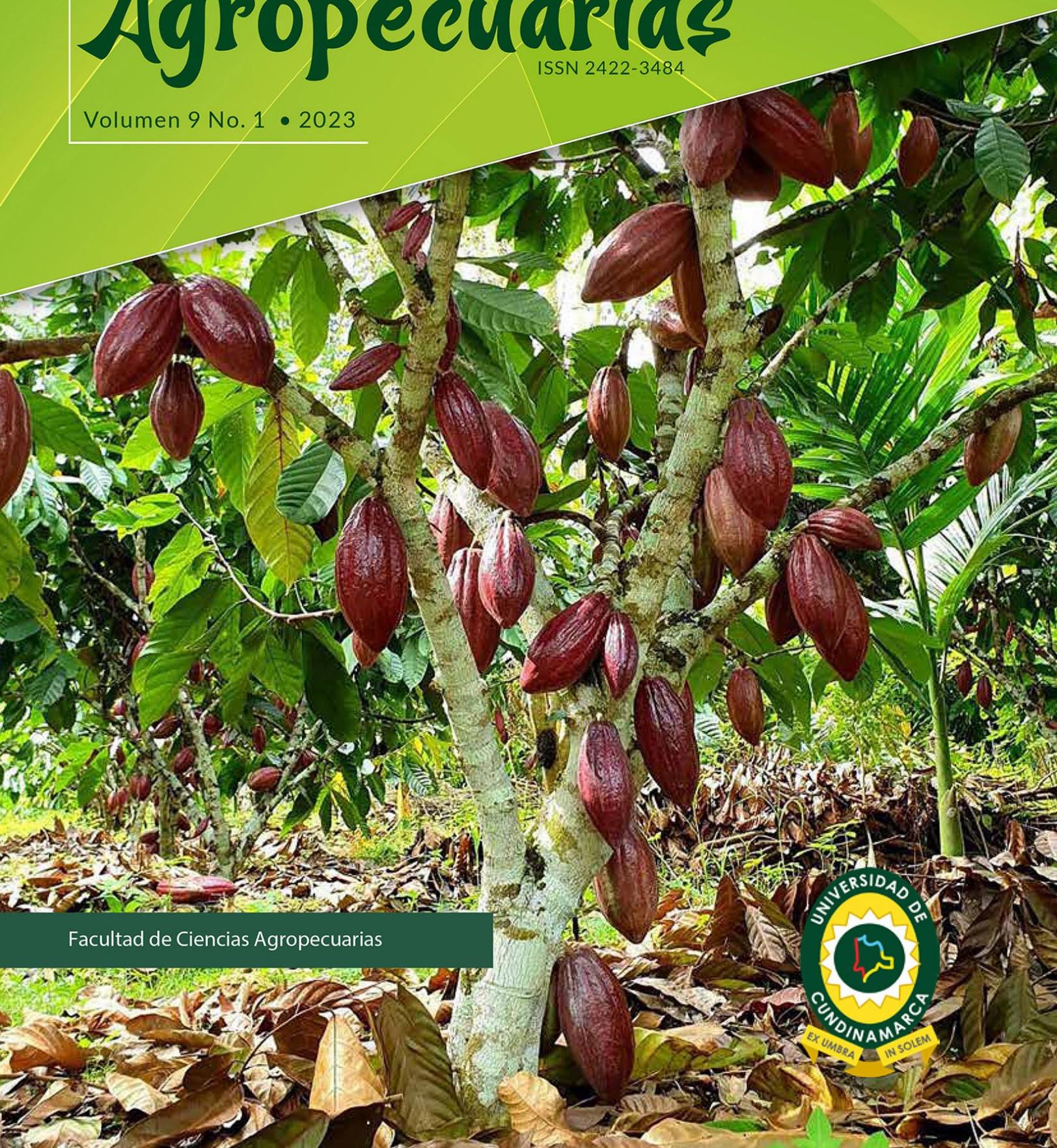


Revista

Ciencias Agropecuarias

ISSN 2422-3484

Volumen 9 No. 1 • 2023



Facultad de Ciencias Agropecuarias





Universidad de
CUNDINAMARCA

Revista Ciencias Agropecuarias - Volumen 9, Número 1

RECTOR

Adriano Muñoz Barrera
Universidad de Cundinamarca, Colombia

VICERRECTOR ACADÉMICO

Víctor Hugo Londoño Aguirre
Universidad de Cundinamarca, Colombia

DECANO

John Alexander Moreno Sandoval
Facultad de Ciencias Agropecuarias

EDITORES

Vilma Moreno Melo
Universidad de Cundinamarca, Colombia

Diego Alexander Hernández Contreras
Universidad de Cundinamarca, Colombia

Rubén Darío González Román
Universidad de Cundinamarca, Colombia

María del Rayo Sánchez Carbente
Universidad Autónoma del Estado de Morelos, México

Amador Goodridge
Instituto de Investigaciones Científicas y Servicios
de Alta Tecnología INDICASAT-AIP, Panamá

Víctor Hugo Herrera Franco
Universidad Nacional de Colombia

Benjamin Dias Osorio Filho
Universidade Estadual do Rio Grande do Sul, Brasil

José Camilo Torres Romero
Universidad Nacional Abierta y a Distancia, Colombia

Ariel Marcel Tarazona Morales
Universidad Nacional de Colombia, Colombia

COMITÉ EDITORIAL

Edwin Davier Correa Rojas
Universidad de Cundinamarca, Colombia

COMITÉ EDITORIAL

Edwin Davier Correa Rojas
Universidad de Cundinamarca, Colombia

Laura Inés Cuervo Soto
Universidad Antonio Nariño, Colombia

Sandra Milena Coronado
Universidad de Cartagena, Colombia

Juan Carlos Osma Roza
Universidad Autónoma de Bucaramanga, Colombia

Edna Rocío Cabrera Martínez
Universidad del Cauca, Colombia

Julie Rosseli Suárez Vera
Corporación Universitaria Minuto de Dios, Colombia

Diego Zanetti
Universidad Federal de Viçosa, Brasil

Ayixon Sánchez Reyes
Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, México

Ramón Alberto Batista García
Universidad Autónoma del Estado de Morelos, México

Los contenidos publicados por la RCA son de acceso
abierto bajo una licencia Creative Commons:
Reconocimiento-NoComercial-SinObrasDerivadas



Editorial
Universidad de
CUNDINAMARCA



DIRECCIÓN DE INVESTIGACIÓN
Universidad de Cundinamarca

CONTENIDO

Editorial. Beneficios de la inversión en Ciencia, Tecnología e Innovación en Colombia / 3-8

Benefits of investing in Science, Technology, and Innovation in Colombia

Vanessa Ramírez Bello y Nelson Enrique Arenas Suárez

1. Crecimiento y desarrollo de brotes durante flujos de crecimiento vegetativo en plantas de aguacate

“Hass” / 9-18

Shoot growth and development during vegetative growth flushes in “Hass” avocado plants

Fabian Giovanny Márquez Niño

2. Impacto de Fusarium odoratissimum raza 4 en la producción y comercialización del banano (Musa x paradisiaca) en Colombia / 19-38

Impact of Fusarium odoratissimum race 4 on production and commercialization of banana (Musa x paradisiaca) in Colombia

Sandra Milena García Camacho y Viviana Gaviria-Hernández

3. Análisis de la cadena productiva de cacao en los contextos local y nacional de Colombia / 39-60

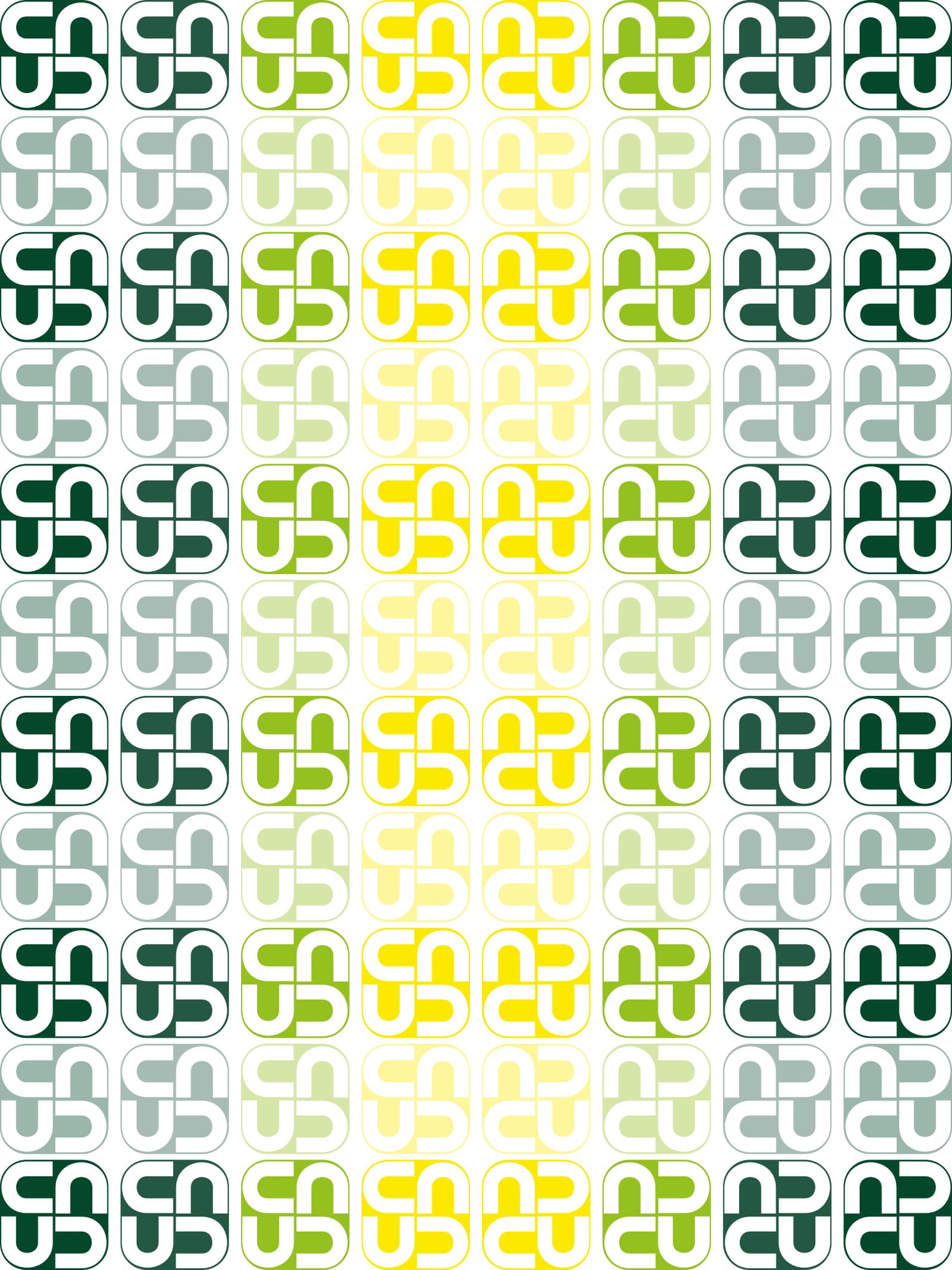
Analysis of the production chain of cocoa in the local and national settings of Colombia

Jorge Alexis Tovar-León, David Camilo Silva-Cobos y Luz Nancy Mateus-Vargas

4. Técnicas de riego no convencionales para el uso eficiente del agua y la mitigación de la variabilidad climática en el cultivo de arroz / 61-71

Use of non-conventional irrigation techniques for efficient water use to mitigate the effects of climate variability on rice cultivation

Ronald Ricardo Martínez-Vega, Sofiane Ouazaa, Nesrine Chaali, Camilo Ignacio Jaramillo-Barrios, John Edinson Calderón Carvajal, José Isidro Beltrán Medina, Óscar Barrero Mendoza y Tom De Swaef



Beneficios de la inversión en Ciencia, Tecnología e Innovación en Colombia

Benefits of investing in Science, Technology, and Innovation in Colombia

Vanesa Ramírez Bello ¹; Nelson Enrique Arenas Suárez ¹

¹Facultad de Ciencias de la Salud. Programa de Medicina. Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales. Bogotá, Colombia; ²Facultad de Medicina. Universidad de Cartagena. Cartagena de Indias, Colombia.

RESUMEN. La inversión en Ciencia, Tecnología e Innovación (CTel) en Colombia es escasa y no está integrada con el sistema de producción, lo que disminuye la competitividad del país a nivel regional. Este editorial estudia la importancia crucial de invertir de manera sostenida y estratégica en CTel como un pilar para el progreso del país y analiza la importancia de una inversión estratégica y sostenida en CTel como pilar para el desarrollo nacional. Se exponen sus beneficios directos, como el crecimiento económico y los avances tecnológicos, e indirectos, como el fortalecimiento educativo y la reducción de la pobreza a largo plazo. Utilizando el caso de Brasil como una advertencia sobre las consecuencias negativas de la desinversión incluyendo la fuga de talento y el estancamiento innovador, se resalta la urgencia de esta situación. Se concluye que el gobierno y el sector privado deben reconocer la inversión en CTel no como un gasto, sino como una piedra angular para construir una sociedad del conocimiento resiliente, sostenible y competitiva en el escenario global.

PALABRAS CLAVE: Ciencia, Tecnología e Innovación (CTel), Colombia, competitividad, desarrollo económico, inversión.

ABSTRACT. Investment in Science, Technology, and Innovation (STI) in Colombia is scarce and not integrated with the production system, which diminishes the country's competitiveness at the regional level. This editorial examines the crucial importance of sustained and strategic investment in STI as a pillar for the country's progress and analyzes the fundamental importance of strategic and sustained investment in STI as a pillar for national development. It presents its direct benefits, such as economic growth and technological advances, and indirect benefits, such as educational strengthening and poverty reduction in the long term. Using the case of Brazil as a warning about the negative consequences of disinvestment including talent flight and innovative stagnation highlighting this critical situation. We conclude that Government and the private sector must recognize investment in STI not as an expense, but as a cornerstone for building a resilient, sustainable, and competitive knowledge society on the global stage.

KEYWORDS: Colombia, competitiveness, economic development, investment, Science, Technology and Innovation (STI).

Para citar este artículo: Ramírez Bello, V. & Arenas Suárez, N. (2023). Beneficios de la inversión en Ciencia, Tecnología e Innovación en Colombia. *Ciencias Agropecuarias* 9(1), 3-8. <https://doi.org/10.36436/24223484.650>



Recibido: 06/12/2022 **Aceptado:** 20/12/2022 **Publicado en línea:** 01/01/2023

Contacto: Vanesa Ramírez Bello - vramirez.b@udca.edu.co

La inversión en Ciencia, Tecnología e Innovación (CTel)

Colombia, un país diverso y multicultural, concentra su población en grandes urbes y presenta un crecimiento económico y una competitividad con marcadas diferencias a nivel regional. Estas diferencias determinan desigualdades en términos de inversión en estructura logística, actividades económicas y desarrollo en Ciencia, Tecnología e Innovación (CTel) (1). Sin embargo, en Colombia aún no se realiza una inversión suficiente y sostenida en CTel para fortalecer las propuestas de valor de los diferentes sectores a nivel nacional. Además, presenta una producción cuantitativamente inferior y cualitativamente menos sofisticada que otros países de la región.

Los gobiernos de los países en desarrollo aún no son conscientes de que la inversión en ciencia genera beneficios multifacéticos que contribuyen directamente al progreso y la prosperidad. Acorde con la realidad nacional, uno de los ministerios que menos presupuesto recibe es el de CTel o Minciencias. Recientemente, el Congreso de la República negó una adición presupuestal para dicha cartera. De este modo, los presupuestos destinados han permitido desarrollar modestamente actividades de CTel, pero con una baja competitividad e innovación en el mercado internacional (2).

La inversión en CTel fomenta los avances tecnológicos, lo que conduce a innovaciones que contribuyen al crecimiento económico y a la creación de empleo. Además, la inversión en ciencia mejora las oportunidades educativas, produciendo una fuerza laboral calificada capaz de impulsar mayores avances (Tabla 1). Indirectamente, desempeña un papel fundamental en la disminución de la pobreza al introducir prácticas sostenibles en la agricultura y la formación profesional. La colaboración global en esfuerzos científicos empodera a las naciones en desarrollo al facilitar el intercambio de conocimientos y la exposición a la experiencia internacional. Los países que más invierten en tecnología reflejan dicha apuesta en sus mayores niveles de producción y desarrollo económico. Por tanto, no se puede subestimar la importancia de una inversión continua en ciencia e investigación para impulsar la innovación y el crecimiento económico, ya que estas consecuencias demuestran el impacto a largo plazo de la reducción de la financiación en estas áreas (3).

Un ejemplo bien conocido de un país que cosecha estos beneficios es Estados Unidos, que tiene una larga historia de inversiones sustanciales en investigación científica, lo que resulta en innovación tecnológica, liderazgo económico y un sólido sistema académico que atrae a los mejores talentos de todo el mundo.

Tabla 1. Beneficios directos e indirectos de la inversión en CTel.

Beneficios directos	
Avances tecnológicos	"La inversión en ciencia conduce al desarrollo de tecnologías de vanguardia. Por ejemplo, la investigación en ciencia de materiales ha llevado a la creación de materiales ligeros y resistentes como la fibra de carbono, que se utilizan en equipos aeroespaciales y deportivos. Incluso con el auge de la inteligencia artificial."
Crecimiento económico	"La innovación científica impulsa el crecimiento económico. Por ejemplo, el desarrollo de la industria de los semiconductores a través de la investigación científica ha llevado a la creación de ecosistemas tecnológicos completos en lugares como Silicon Valley."
Salud y medicina	"La investigación científica contribuye a los avances en la atención sanitaria y al desarrollo de tratamientos y medicamentos que salvan vidas. Un ejemplo notable es el rápido desarrollo de vacunas contra la COVID-19 gracias a la investigación científica."
Sostenibilidad ambiental	"La investigación científica puede ayudar a los países a abordar los desafíos ambientales. Por ejemplo, la inversión en tecnologías de energía renovable como la solar y la eólica es esencial para un futuro sostenible."
Beneficios indirectos	
Educación	"La investigación científica contribuye al avance educativo. Las universidades de investigación atraen a estudiantes y profesores, lo que genera una fuerza laboral calificada. Por ejemplo, el MIT en Estados Unidos atrae talentos de todo el mundo."
Reputación global	"Una fuerte inversión en ciencia puede mejorar la reputación global de un país. Los países conocidos por su excelencia científica, como Alemania, atraen colaboración e inversión internacionales."
Ecosistema de innovación	"La inversión en ciencia fomenta los ecosistemas de innovación. Por ejemplo, el crecimiento de centros tecnológicos como Shenzhen en China ha sido impulsado por importantes inversiones en ciencia y tecnología."
Seguridad Nacional	"La investigación científica también puede mejorar la seguridad nacional, tanto directamente a través de tecnologías relacionadas con la defensa como indirectamente a través de la detección temprana de amenazas emergentes."
Enriquecimiento cultural e intelectual	"La ciencia contribuye al enriquecimiento cultural e intelectual de una nación. Los museos, los centros científicos y los eventos culturales relacionados con la ciencia realzan la capital cultural de una nación."

La experiencia de Brasil

Brasil tiene una historia de excelencia científica, pero en los últimos años, el país ha enfrentado desafíos económicos, inestabilidad política y menores inversiones en CTel, lo que ha repercutido negativamente en la ciencia brasileña (4,5). En este caso, la reducida inversión de Brasil en ciencia ha tenido una serie de consecuencias negativas, incluida una fuga de personal científico calificado, desafíos económicos, deterioro educativo y una disminución de la competitividad científica del país a nivel global (Tabla 2).

Tabla 2. Consecuencias negativas de reducción de la inversión en ciencia en Brasil (4,5).

Consecuencias	Descripción
Fuga de talento	"La reducción de la financiación para la investigación y la falta de oportunidades laborales en la ciencia han provocado una importante fuga de talento. Científicos e investigadores calificados están abandonando el país para buscar mejores oportunidades en otros lugares, agotando el capital intelectual de Brasil."
Innovación estancada	"La falta de inversión en ciencia y tecnología ha resultado en un estancamiento de la innovación. Las empresas brasileñas luchan por competir globalmente debido a tecnologías obsoletas y a la reducción de las actividades de investigación y desarrollo."
Impacto Económico	"La reducción de la investigación científica y la innovación ha tenido un impacto negativo en la economía brasileña. El país está rezagado en industrias como la tecnología de la información, la biotecnología y la energía renovable, perdiendo potencial de crecimiento económico."
Disminución de la educación	"La reducción de la financiación afecta la educación, lo que genera menos oportunidades para los estudiantes y una disminución de la calidad de la educación científica. Esto tiene consecuencias a largo plazo para el desarrollo de futuros científicos e investigadores."
Competitividad global reducida	"La reducida inversión de Brasil en ciencia ha resultado en una pérdida de competitividad en el escenario global. El país lucha por mantenerse al día con los avances científicos, lo que lo coloca en desventaja en las colaboraciones y el comercio internacionales."
Desafíos ambientales	"Brasil es conocido por sus diversos ecosistemas, pero la reducción de las inversiones en ciencia ha obstaculizado la investigación sobre conservación ambiental y desarrollo sostenible. Esto ha provocado una mayor deforestación en la selva amazónica y otros desafíos ambientales."
Impacto en la salud	"La falta de inversión en investigación sanitaria puede tener consecuencias negativas, especialmente durante crisis sanitarias mundiales como la pandemia de COVID-19. Brasil enfrentó desafíos en el desarrollo de vacunas y tratamientos debido a la limitada capacidad de investigación."

De hecho, en los últimos años Brasil alcanzó el punto conocido como "el efecto de la Reina Roja", situación en la que el esfuerzo invertido solo permite mantenerse en el mismo lugar, generando un estancamiento. Esta parálisis es consecuencia de la desarticulación de los actores del sistema de CTel y que sólo se podría solucionar con cambios estructurales en las políticas de desarrollo industrial del país articulado con un sistema propio de innovación (6).

Nuestra realidad y nuestros retos

En nuestro país existe desarticulación entre los actores del sistema productivo con el sistema educativo y de CTel. En este contexto local, muchas empresas se desentienden de su responsabilidad social con el país y rara vez incluyen actividades de tipo académico, investigativo e innovación en sus respectivas misiones. Incluso desconocen que tienen beneficios tributarios por invertir en actividades de CTel (7).

Las acciones futuras del gobierno deben reconocer la inversión en ciencia, no sólo como un catalizador del progreso, sino como una piedra angular para construir sociedades resilientes, sostenibles e innovadoras basadas en el conocimiento (8). En resumen, la rentabilidad de invertir en la CTel radica en su impacto transformador en las industrias, el estímulo de la innovación, la solución a los desafíos sociales, el desarrollo de una fuerza laboral calificada y la elevación de la posición global de un país en el futuro impulsado por la tecnología.

Referencias

1. Solano Benavides E, Alandete Brochero N, Amelec V. Análisis de componentes principales en la competitividad en Colombia. Rev Ibérica Sist e Tecnol Inf [Internet]. 2019 [citado el 3 de diciembre de 2023]. Disponible en: <https://repositorio.cuc.edu.co/handle/11323/5951>
2. Echeverría-King LF, Pinto J, Mosquera-Montoya MAL. Inversión en actividades de ciencia, tecnología e innovación: el caso de Colombia y Ecuador. Rev. CEA [Internet]. 30 de mayo de 2021 [citado el 3 de diciembre de 2023];7(14):e1672. Disponible en: <https://revistas.itm.edu.co/index.php/revista-cea/article/view/1672>
3. Puentes-Buitrago F. Competitividad de las empresas colombianas a nivel global. Rev Sinergia [Internet]. 2019 [citado el 3 de diciembre de 2023];(5):9-35. Disponible en: <http://sinergia.colmayor.edu.co/ojs/index.php/Revistasinergia/article/view/72>

4. Junior AAB, Faria WR, Montenegro RLG, Bahia DS, Gonçalves E. Research and development, productive structure and economic effects: Assessing the role of public financing in Brazil. *Econ Model.* 2020; 90:235-53.
5. Soares TJ, Torkomian AL, Nagano MS. University regulations, regional development and technology transfer: The case of Brazil. *Technol Forecast Soc Change.* 2020;158:120129.
6. Chaves CV, Ribeiro LC, Dos Santos UP, Albuquerque EM. Sistemas de innovación y cambios en la división centro-periferia: notas sobre una metodología para determinar las trayectorias de los países a partir de las estadísticas de ciencia y tecnología. *Rev CEPAL [Internet].* 2020 [citado el 3 de diciembre de 2023];(130):45-64. Disponible en: <https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/6d3ece7a-7d5e-4173-b153-19fa62162e7f/content>
7. Palacio JCT, Padilla JB, Villasmil-Molero MC, Socorro C. Beneficios tributarios para proyectos de ciencia, tecnología e innovación en Colombia. *Rev Cienc Soc.* 2020;26(2):107-19.
8. Fidanoski F, Simeonovski K, Kaftandzieva T, Ranga M, Dana LP, Davidovic M, et al. The triple helix in developed countries: when knowledge meets innovation? *Heliyon.* 2022;8(8):e10168.

Crecimiento y desarrollo de brotes durante flujos de crecimiento vegetativo en plantas de aguacate “Hass”

Shoot growth and development during vegetative growth flushes in “Hass” avocado plants

Fabian Giovanni Márquez Niño ¹

¹Ingeniería Agronómica, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad de Cundinamarca, Fusagasugá, Cundinamarca, Colombia

RESUMEN. El aguacate es una planta perenne nativa de América Central que, al igual que otros árboles frutales, presenta un crecimiento rítmico; se distinguen etapas de flujos de crecimiento y etapas de reposo de las yemas. Se evaluó la ocurrencia de flujos de crecimiento vegetativo en plantas de aguacate juveniles de variedad “Hass”, el tiempo promedio de duración de los flujos, la cantidad de yemas abortadas, el crecimiento en longitud, la formación de ramas y de entrenudos durante un flujo de crecimiento vegetativo. El periodo de tiempo promedio de los flujos fue de 31 días, y el número de yemas activas en promedio disminuyó desde seis hasta tres, evidenciándose abscisión. Las ramificaciones terciarias presentaron una tendencia de crecimiento cuadrático, con una disminución paulatina hasta llegar a un valor constante de seis ramas, mientras que el crecimiento en longitud de los brotes se aproximó a una curva sigmoidea.

PALABRAS CLAVE: alargamiento del tallo, brote de yemas, crecimiento, cultivo, desarrollo.

ABSTRACT. The avocado is a perennial plant native to Central America that, like other fruit trees, presents a rhythmic growth; stages of growth flushes and stages of bud dormancy are distinguished. The occurrence of vegetative growth flows in juvenile avocado plants of the “Hass” variety, the average duration of the flows, the number of aborted buds, the growth in length, the formation of branches and internodes during a flow were evaluated. The average time of the flows was 31 days; the number of active buds on average decreased from six to three, evidencing abscission. The tertiary branches showed a quadratic growth trend, with a gradual decrease until reaching a constant value of six branches, while the growth in length of the shoots approached a sigmoid curve.

KEYWORDS: bud sprouting, cultivation, development, growth, stem elongation.

Para citar este artículo: Márquez Niño, F. G. (2023). Crecimiento y desarrollo de brotes durante flujos de crecimiento vegetativo en plantas de aguacate “Hass”. *Ciencias Agropecuarias* 9(1), 9-18. <https://doi.org/10.36436/24223484.373>



Recibido: 27/07/2021 **Aceptado:** 10/01/2023 **Publicado en línea:** 20/01/2023
Contacto: Fabian Giovanni Márquez Niño - fgmarquez@ucundinamarca.edu.co

Introducción

El aguacate (*Persea americana* Mill.) es una planta perenne nativa de América Central y se considera un cultivo de gran importancia mundial que es producido actualmente en cerca de 70 países, siendo Colombia uno de los cinco principales productores (1). Dentro de la especie se distinguen tres variedades, estas provienen de tres razas ecológicas conocidas como: *Persea americana* var. *drymifolia* (mexicana), var. *guatemalensis* (guatemalteca) y var. *americana* (antillana) (2). A partir de esas variedades se han generado híbridos que se adaptan a distintas condiciones ambientales. El cultivar “Hass”, desarrollado en California, se adapta bien a zonas de montaña tropical donde el frío es un factor limitante para otros tipos de aguacate y actualmente es el cultivar más importante a nivel mundial (1,3).

Como es común en otros árboles tropicales, el aguacatero tiene crecimiento rítmico, en el que la extensión del tallo es periódica y se alterna con cortos periodos de reposo; se presentan dos o más flujos de crecimiento de brotes por año dependiendo de las condiciones climáticas de la zona en donde crece (4–9). En un estudio realizado por Rocha et al. (2011) en variedad de climas en México y en huertos con y sin riego, se encontró que en todos los climas y tanto en huertos con riego como sin riego, la variedad “Hass” presentó tres flujos de crecimiento vegetativo: invierno (mayor intensidad), primavera y verano (menor intensidad) (10). Por otro lado, en California se conocen típicamente dos flujos por año: uno en primavera y otro en verano (11).

Las yemas axilares formadas durante un flujo de crecimiento determinado pueden permanecer en reposo, brotar durante el mismo flujo, o brotar durante el siguiente. Durante los períodos de reposo de los meristemas se evidencian escamas a su alrededor; estas se abren y caen al presentarse el flujo de crecimiento, dejando cicatrices. Adicionalmente se distinguen dos tipos de brotes axilares: prolépticos (formados después de un periodo de reposo de su meristemo apical) o silépticos (formados sin un periodo de reposo) con una proporción relativa entre los dos que depende del cultivar (6).

En estudios de crecimiento y desarrollo es importante identificar los estadios de las estructuras tanto en etapas reproductivas como vegetativas. La escala extendida BBCH es un sistema para una codificación uniforme de identificación fenológica de estadios de

Crecimiento y desarrollo de brotes durante flujos de crecimiento vegetativo en plantas de aguacate “Hass”

crecimiento para todas las especies de plantas mono y dicotiledóneas, que permite identificar con dos dígitos todos los estadios fenológicos presentes en las plantas, estandarizando su nominación (12). En el presente estudio se identifican los principales estados BBCH del crecimiento vegetativo y el tiempo de duración, para evaluar el crecimiento de los brotes principales y el desarrollo de brotes prolépticos y silépticos en plantas juveniles de aguacate “Hass” en condiciones tropicales.

Materiales y métodos

Localización y material vegetal

Los datos fueron tomados en plantas de Aguacate “Hass” en estado juvenil (6 meses) establecidas con un sistema de siembra de 10m x 10m, ubicadas en el municipio de Pasca (departamento de Cundinamarca) con latitud 4°18'25" N, longitud 74°19'35" W y una altitud de 1,860 m.s.n.m. La temperatura promedio durante la época de estudio fue de 18.2 °C, humedad relativa de 83.1 %, radiación PAR de 366 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ y una precipitación acumulada de 663 mm.

Caracterización fenológica

La caracterización fenológica se realizó entre los meses de abril del año 2015 y abril de 2016 en 15 plantas tomadas como muestra de un cultivo de 90 plantas. Para ello, se observó el meristemo apical y se identificó el estadio BBCH según lo propuesto por Alcaraz et al. (2013) (6). Los distintos estadios fueron codificados y posteriormente se calculó el porcentaje de plantas en estadios de flujo de crecimiento vegetativo, el tiempo promedio del flujo total y de la expansión de hojas, así como el número de flujos totales por planta.

Evaluación del crecimiento y el desarrollo vegetativo

La evaluación del crecimiento se realizó en el intervalo de tiempo que comprendió la época en la que el mayor porcentaje de plantas presentó flujo de crecimiento y corresponde a un ciclo de flujo desde el estadio BBCH 09 (yema totalmente abierta) hasta la expansión total de las hojas y fin del flujo (estadio BBCH 19). En tres ramas por planta se midió semanalmente la longitud del brote principal, el número de entrenudos del brote principal,

el número de ramificaciones generadas a partir de brotes axilares del mismo flujo y el número de yemas del flujo anterior activas.

Análisis estadístico

Los datos de longitud de los brotes fueron analizados como variable dependiente por medio de un modelo lineal simple donde la variable independiente fue el tiempo de monitoreo. El modelo estadístico que describe los datos es $y_i = \beta_0 + \beta_1 X_i + \epsilon_i$; donde y_i es la longitud de los brotes en la i -ésima observación, β_0 el intercepto, β_1 la pendiente, X_i el tiempo en la i -ésima observación y ϵ_i el error residual. Se evaluaron los supuestos del modelo (independencia entre las observaciones, homocedasticidad y la normalidad de los residuos).

Se realizó un análisis de comparación de medias (Tukey HSD) con un ($p < 0.05$) para estimar el peso de los parámetros evaluados. Los datos de conteo de número de yemas, número de entrenudos y número de ramificaciones fueron linealizados y ajustados a un modelo lineal simple de forma similar, utilizando el software R Project 3.3.1. El porcentaje de brotes se presenta de forma descriptiva como porcentaje de plantas en flujo del total de 15 plantas muestreadas en cada fecha.

Resultados y discusión

El análisis descriptivo de los datos (Figura 1) permite evidenciar que los flujos de crecimiento vegetativo no tuvieron sincronía precisa en las plantas estudiadas, por lo que no fue posible encontrar la totalidad de las plantas en estado de flujo o reposo en un mismo instante. Sin embargo, fue posible identificar fechas en las que la proporción de plantas en flujo fue mayor a la de plantas en reposo.

Entre el 16 y el 23 de octubre de 2015 se encontró el mayor porcentaje de plantas en flujo, con un valor de 64.3 % (Figura 1). Este ciclo de crecimiento se prolongó hasta cerca del 20 de noviembre de 2015 con un porcentaje de 21.4%. Teniendo en cuenta estos porcentajes, se hizo el seguimiento de las variables de crecimiento y desarrollo en el periodo de tiempo promedio de 31 días que duró el ciclo.

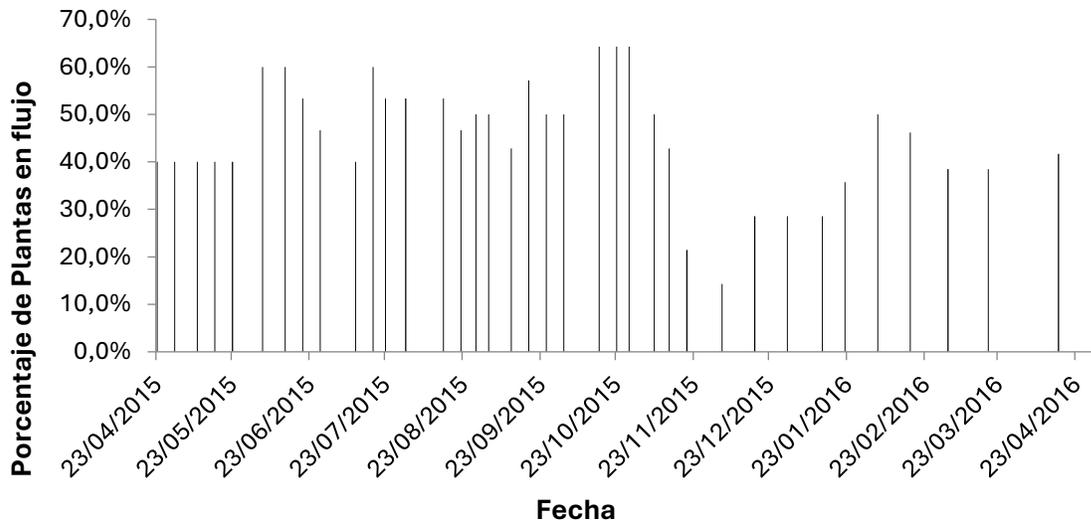


Figura 1. Porcentaje de plantas de Aguacate “Hass” en Pasca Cundinamarca en flujo de crecimiento vegetativo (n=15) entre los meses de abril de 2015 y abril de 2016

El número de yemas activas corresponde a las yemas axilares y apicales que entraron en actividad después de un periodo de reposo y que fueron formadas durante el brote anterior, e indican la cantidad de ramificaciones de brotes prolépticos. Dicho número disminuyó desde seis hasta tres (Figura 2A), evidenciándose abscisión. La abscisión se prolongó hasta el día 24, a partir del cual el número de brotes permaneció constante hasta el final del periodo de evaluación (31 días), por lo que en promedio se presentan dos ramificaciones generadas a partir de brotes prolépticos.

Fue posible ajustar los datos de yemas activas a un modelo lineal con un R^2 de 90.97 % (Figura 3A) entre los días cero a 24. El número de entrenudos no presentó una tendencia sigmoidea, más bien se observa un crecimiento lineal hasta el día 24 (Figura 2B), a partir del cual el número permaneció constante (12 nudos). Los datos se ajustaron a un modelo lineal para la etapa de cero a 24 días y se encontró una tasa de crecimiento de 0.81 log (entrenudos)/día (Figura 3B).

Como se evidencia en la Figura 3C, las ramificaciones terciarias o de brotes silépticos presentaron una tendencia de crecimiento cuadrático, en la que la velocidad de formación de ramas inicialmente rápida fue presentando una disminución paulatina hasta llegar a un valor constante de seis ramas hacia el día 18, se encontró una tasa de 0.52 Log (ramas)/día.

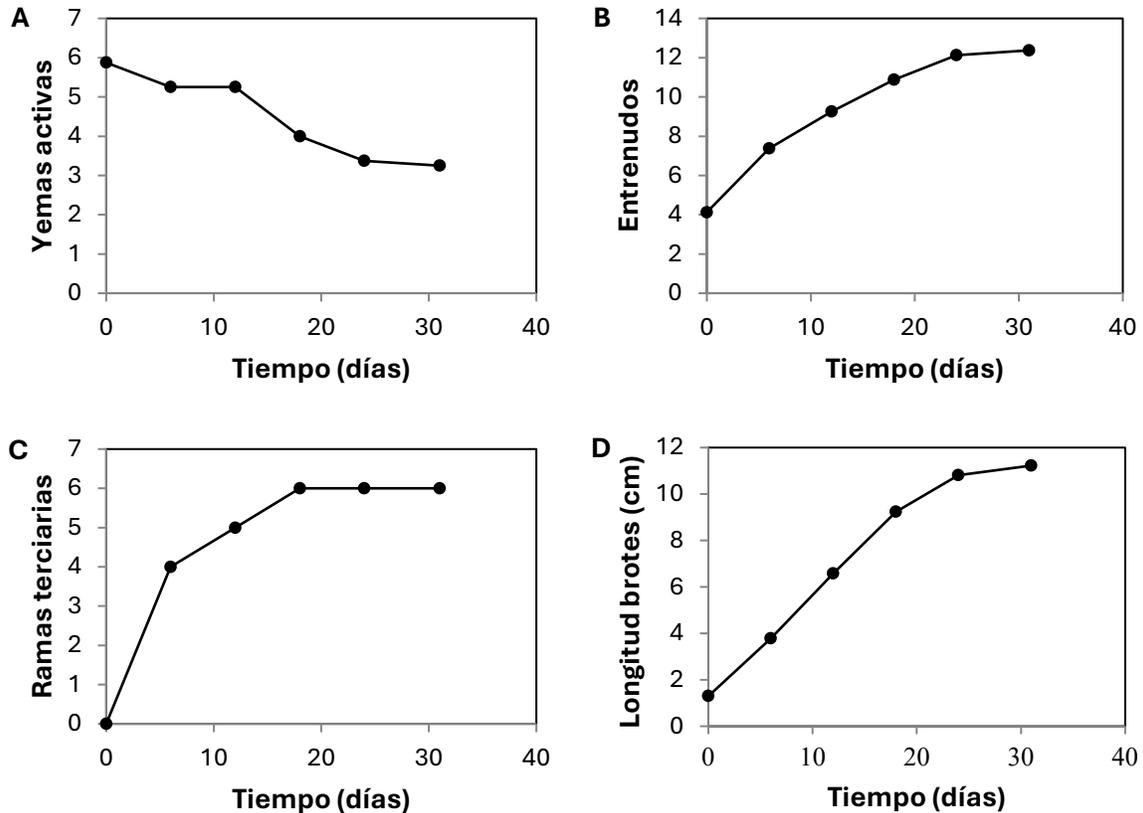


Figura 2. Crecimiento y desarrollo de brotes de plantas juveniles de Aguacate “Hass” en Pasca Cundinamarca. A. Número de yemas activas; B. Número de entrenudos generados en los brotes principales; C. Número de ramificaciones silépticas generadas en los brotes principales; D. Longitud de los brotes principales. Los datos son mostrados como medias (n=15).

El crecimiento en longitud de los brotes presentó un comportamiento con tendencia sigmoidea (Figura 2D); entre los cero y los seis días el crecimiento fue más lento que el que se presentó entre los seis a 18 días, y posteriormente, hasta el día 31, el crecimiento disminuyó. Se calculó la tasa de crecimiento para la etapa lineal (seis a 18 días) y fue de 1.44 cm/día con un R^2 de 99.21 % (Figura 3D).

Los flujos de crecimiento vegetativo no tuvieron sincronía precisa entre las plantas estudiadas, pero en cada planta sí fue posible observar sincronía entre los brotes, lo que corresponde a lo reportado por Dixon (13), quien encontró que no hubo periodos de crecimiento constante, pero el crecimiento de los brotes fue sincrónico dentro del árbol, iniciando y terminando al mismo tiempo en todas las ramas (13).

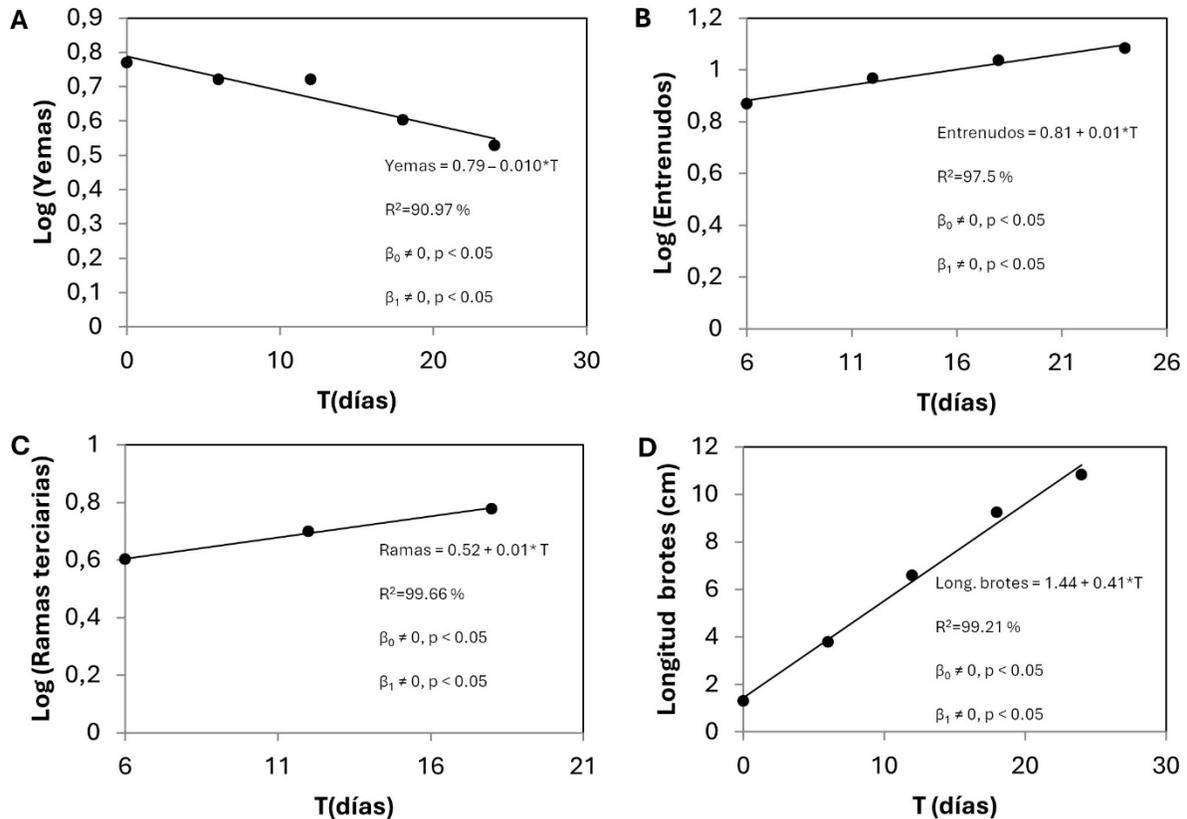


Figura 3. Crecimiento y desarrollo de brotes de plantas juveniles de Aguacate “Hass” en Pasca Cundinamarca. A. Número de yemas activas; B. Número de entrenudos generados en los brotes principales; C. Número de ramificaciones silépticas generadas en los brotes principales; D. Longitud de los brotes principales. Los datos fueron ajustados a un modelo lineal ($p \leq 0.05$).

Los resultados del presente trabajo evidencian abscisión de yemas axilares en reposo, por lo que el número de brotes prolépticos es menor al número de yemas axilares formadas inicialmente. Aunque son escasos los trabajos actuales sobre el desarrollo vegetativo del aguacate, muchas de las características del desarrollo que hoy se conocen son producto de trabajos clásicos. Venning y Lincoln (14) indicaron que la abscisión de yemas es un proceso natural en el desarrollo del aguacatero, que los brotes que entraron en reposo durante un flujo de crecimiento sufren frecuentemente abscisión, a menudo antes de la abscisión de la hoja subyacente. Incluso una vez iniciado el proceso de brote en yemas persistentes, estas pueden presentar abscisión y, por tanto, el número total final de yemas se ve reducido por la abscisión de éstas durante su periodo de reposo (14).

El número total de entrenudos corresponde con los hallazgos de Thorp et al. (5), quienes reportan un promedio de 12 entrenudos por módulo de brotes vegetativos prolépticos, que además fueron preformados durante la época de reposo de las yemas (5). En el presente estudio sólo se evaluó el número de entrenudos de brotes silépticos, porque el conteo se realizó en los brotes principales.

Para el crecimiento en longitud se distinguió un patrón de crecimiento sigmoideo. Los brotes de aguacate crecen en un patrón bien definido, donde empiezan a crecer lentamente, luego la longitud del brote se incrementa linealmente en una tasa relativamente estable antes de que el crecimiento disminuya y se detenga (13). Este comportamiento sigmoideo, si bien se encontró para el crecimiento en longitud, no es el mismo que se observa para la aparición de entrenudos. La longitud total de los brotes fue mayor (112 mm) que la reportada por Kohne y Kremer (15), en la que la longitud de brotes en las plantas control de un experimento de tratamiento con paclobutrazol fue de 70.2 mm (15).

Conclusiones

Las yemas persistentes pueden ser abortas antes o después de su reactivación durante un nuevo flujo. El número de entrenudos no presenta un patrón de crecimiento sigmoideo como el que se encuentra en el crecimiento en longitud de los brotes. El número de ramificaciones de origen siléptico fue mayor a las ramificaciones de origen proléptico debido al aborto de yemas persistentes. La aparición de entrenudos y ramas terciarias fue constante desde el comienzo, pero con una etapa más lenta hacia el final del flujo.

Agradecimientos

Al Proyecto 1 “Ecofisiología, nutrición mineral y manejo integrado de plagas y enfermedades en aguacate, curuba, gulupa y tomate de árbol orientados hacia su manejo agronómico, como materia prima para el desarrollo de productos de interés comercial”, de la Red Nacional para la bioprospección de frutos tropicales, financiado por el Departamento Administrativo de Ciencias, Tecnología e Innovación - COLCIENCIAS y ejecutado por la Universidad Nacional de Colombia. Código: 110154332012; contrato 459/2013.

Declaración de divulgación

El autor declara que no existe ningún potencial conflicto de interés relacionado con el artículo. No se emplearon herramientas de generación de contenido por inteligencia artificial para la elaboración del artículo.

Referencias

1. Kourgialas NN, Dokou Z. Water management and salinity adaptation approaches of Avocado trees: A review for hot-summer Mediterranean climate. *Agric Water Manag* [Internet]. 2021 [citado 29 de junio de 2021];252:1-12. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106923>
2. Saavedra R, Vásquez HD, Mejía E. Aguacate (*Persea americana* Mill.). En: Fischer G, editor. Manual para el cultivo de frutales en el trópico. Bogotá, Colombia: Produmedios; 2012. p. 319-48.
3. Cossio LE, Hernández LM, López JG, Gómez R, Sánchez R. Flujos de crecimiento vegetativo y reproductivo del aguacate ‘Hass-Méndez’ en Nayarit, México. En: Actas VII Congreso Mundial del Aguacate [Internet]. Cairns, Australia; 2011. p. 1-10. Disponible en: http://www.avocadosource.com/wac7/Section_06/CossioVargasLE2011.pdf
4. Thorp T, Sedgley M. Architectural analysis of tree form in a range of avocado cultivars. *Sci Hortic (Amsterdam)* [Internet]. 1993;53(1-2):85-98. Disponible en: [https://doi.org/10.1016/0304-4238\(93\)90140-L](https://doi.org/10.1016/0304-4238(93)90140-L)
5. Thorp T, Aspinall D, Sedgley M. Preformation of Node Number in Vegetative and Reproductive Proleptic Shoot Modules of *Persea* (Lauraceae). *Ann Bot* [Internet]. 1994;73(1):13-22. Disponible en: <http://www.jstor.org/stable/42758997>
6. Alcaraz ML, Thorp TG, Hormaza JI. Phenological growth stages of avocado (*Persea americana*) according to the BBCH scale. *Sci Hortic (Amsterdam)* [Internet]. 2013 [citado 29 de junio de 2021];164:434-9. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2013.09.051>
7. Thorp T, Sedgley M. Shoot Growth and Tree Architecture in a Range of Avocado Cultivars. En: Proceedings of the Second World Avocado Congress [Internet]. Orange, California; 1992. p. 237-40. Disponible en: http://www.avocadosource.com/WAC2/WAC2_p237.pdf
8. Salazar-García S, Cossio-Vargas LE, Lovatt CJ, González-Durán IJL, Pérez-Barraza MH. Crop Load Affects Vegetative Growth Flushes and Shoot Age Influences Irreversible Commitment to Flowering of ‘Hass’ Avocado. *HortScience* [Internet]. 2006;41(7):1541-6. Disponible en: <https://journals.ashs.org/hortsci/view/journals/hortsci/41/7/article-p1541.xml>
9. D’Asaro A, Reig C, Martínez-Fuentes A, Mesejo C, Farina V, Agustí M. Hormonal and carbohydrate control of fruit set in avocado ‘Lamb Hass’. *Sci Hortic (Amsterdam)* [Internet]. 2021 [citado 29 de junio de 2021];282. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110046>
10. Rocha J, Salazar S, Bárcenas AE, González IJ, Cossio LE. Fenología del aguacate “Hass” en Michoacán. *Rev Mex Cienc Agríc* [Internet]. 2011;2(3):303-16. Disponible en: <https://bit.ly/3qBAov8>

11. Robinson PW, Mickelbart MV, Arpaia ML. “Hass” avocado phenology in California—preliminary results. *HortScience*. 1994;29(5):517c.
12. Meier U. Etapas de desarrollo de las plantas monocotiledóneas y dicotiledóneas BBCH Monografía [Internet]. Quedlinburg, Alemania: Instituto Julius Kühn; 2018. 11 p. Disponible en: <https://bit.ly/3qHZqJj>
13. Dixon J. Shoot growth of “Hass” avocado trees in «on» and «off» flowering years in the western bay of plenty. *N Z Avocado Grow Assoc Annu Res Rep* [Internet]. 2007;7:41-8. Disponible en: <https://bit.ly/3Ajn9nz>
14. Venning FD, Lincoln FB. Developmental morphology of the vegetative axis of avocado (*Persea americana* L.) And its significance to spacing, pruning practices, and yields of the grove. *Proc Fla State Hort Soc* [Internet]. 1958;71:350-6. Disponible en: <https://bit.ly/3wfOzHu>
15. Kohne JS, Kremer S. Vegetative growth and fruit retention in avocado as affected by a new plant growth regulator (Paclobutrazol). En: *Proceedings of the First World Avocado Congress*. South Africa; 1987. p. 64-6.

ARTÍCULO DE REVISIÓN

Impacto de *Fusarium odoratissimum* raza 4 en la producción y comercialización del banano (*Musa x paradisiaca*) en Colombia

Impact of *Fusarium odoratissimum* race 4 on production and commercialization of banana (*Musa x paradisiaca*) in Colombia

Sandra Milena García Camacho ¹; Viviana Gaviria-Hernández ¹

¹Ingeniería Agronómica, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad de Cundinamarca, Facatativá, Cundinamarca, Colombia

RESUMEN. El banano es un cultivo estratégico para la seguridad alimentaria en Colombia y constituye uno de los alimentos de importancia a nivel socioeconómico por la oportunidad de generación de empleos, ganancias e ingresos. Sin embargo, hay una diversidad de factores que interfieren en el adecuado proceso de producción y comercialización del fruto; destaca el hongo fitopatógeno *F. odoratissimum* raza 4 (*Foc* R4T), patógeno que afecta clones de banano tipo Cavendish, una de las principales variedades exportadas por Colombia. Actualmente, este hongo genera grandes pérdidas económicas en el sector bananero debido a su agresividad, generando marchitez y la muerte de la planta, agravado por la ausencia de medidas que permitan su control de una manera radical y eficiente. El objetivo de este artículo de revisión se enmarca en el abordaje de cuatro categorías, las cuales permiten establecer la importancia del cultivo del banano en Colombia y los mercados internacionales, el estudio de la patogénesis de *Foc* R4T, los efectos del hongo sobre la cadena productiva y comercial del banano y, finalmente, las principales estrategias de control. Para la elaboración del presente artículo, fue realizada una búsqueda en diversas bases de datos que permitieron realizar una revisión narrativa, descriptiva y cualitativa con el propósito de generar una actualización.

PALABRAS CLAVE: banano, Cavendish, comercialización, *Fusarium*, producción.

ABSTRACT. Banana is a strategic crop for food security in Colombia and is a socio-economically important food source due to its potential to generate jobs, profits, and income. However, a variety of factors interfere in the proper production and marketing process, notably the phytopathogenic fungus *F. odoratissimum* race 4 (*Foc* R4T), a pathogen that affects Cavendish-type banana clones, one of the main varieties exported by Colombia. Currently, this fungus causes great economic losses in the banana sector due to its aggressiveness, generating wilting and death of the plant, compounded by the absence of measures for its radical and efficient control. The objective of this review article focuses on four categories: the importance of banana cultivation in Colombia and international markets, the pathogenesis of *Foc* R4T, its effects on the banana production and commercial chain, and finally, the main control strategies. For the preparation of this article, a search was conducted in various databases to carry out a narrative, descriptive, and qualitative review in order to generate an update.

KEYWORDS: banana, Cavendish, commercialization, *Fusarium*, production.

Para citar este artículo: Milena García, S. & Gaviria-Hernández, V. (2023). Impacto de *Fusarium odoratissimum* raza 4 en la producción y comercialización del banano (*Musa x paradisiaca*) en Colombia. *Ciencias Agropecuarias* 9(1), 19-38. <https://doi.org/10.36436/24223484.366>



Recibido: 20/10/2021 Aceptado: 20/01/2023 Publicado en línea: 30/01/2023

Contacto: Sandra Milena García - smgarciacamacho@ucundinamarca.edu.co

Introducción

El banano es uno de los principales cultivos en la producción y comercialización agraria a nivel mundial. Según datos de la FAO del 2023, se estimó que las exportaciones de banano a nivel mundial alcanzaron aproximadamente 19,3 millones de toneladas, con un aumento del 0.3% en comparación con el año 2022. Adicionalmente, las exportaciones de América Latina y el Caribe disminuyeron en un 1.1 % en el 2023, alcanzando los 14,5 millones de toneladas exportadas (1). La demanda a nivel mundial de banano ha venido presentando un crecimiento considerable debido a que se ha presentado como una importante fuente de ingresos para la economía de los países que producen esta fruta, sumado también a la emergente demanda en el mercado internacional de este producto (2).

Entre los años 2002 a 2021, la producción a nivel global pasó de 84 millones de toneladas a 58 millones de toneladas, reflejando así un decrecimiento (3). En América Latina y el Caribe el 64% de la producción de musáceas son destinadas al consumo interno y el 36% es destinado al mercado internacional, resaltando de esta manera la importancia que tiene en los mercados nacionales e internacionales (4). En esta región, cinco países están entre los diez primeros exportadores de banano en el mundo, entre los cuales se encuentran: Ecuador, Costa Rica, Guatemala, Colombia y República Dominicana (1,3).

A nivel mundial, el cultivo de banano está presente en todas las regiones tropicales y subtropicales, principalmente en Latinoamérica con una participación de 14,5 millones de toneladas, seguido de Asia con 3.9 millones de toneladas y finalmente, África con una participación de 0.7 millones de toneladas en la exportación de bananos (5). Entre los principales países productores y comercializadores de banano, Colombia se encuentra ocupando el duodécimo puesto con una producción de 1.8 % de la producción mundial y el quinto mayor productor en América latina (3). En el ámbito del comercio exterior, Colombia para el año 2022 fue el cuarto mayor exportador de banano (5).

Las características agrícolas en Colombia asociadas a la disponibilidad de vastos recursos naturales, especialmente variedad de suelos, han establecido una ventaja estratégica en el desarrollo productivo de las principales zonas bananeras, ubicadas en los departamentos de Valle del Cauca, Quindío, Antioquia, Cundinamarca, Huila, Chocó y

Nariño (6), los cuales entre 1991 y 2015 concentraron en la exportación agrícola bananera uno de sus principales rubros económicos, con una participación del 17.6% en bananos frescos (7), dando paso a que Colombia ocupe el duodécimo puesto en producción a nivel mundial de esta fruta (3).

La cadena agrícola del banano en Colombia está conformada principalmente por los productores, comercializadores, proveedores de insumos y semillas, empresas exportadoras, centros de investigación, instituciones y universidades que acompañan el proceso, tales como: el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA), el Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA), el Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD), la Asociación Hortifrutícola de Colombia (ASOHOFRUTCOL), la Secretaría de Agricultura y la Corporación Autónoma Regional (CAR) (8). Estas instituciones son un factor clave que garantiza una cadena productiva idónea, que, en conjunto con condiciones edafoclimáticas adecuadas, han permitido incrementar la producción bananera tipo exportación en Colombia en cerca del 91% de la producción nacional en años de abundancia como el 2019 (9).

En el país se cultivan y comercializan el banano criollo, destinado al consumo propio, y el banano tipo exportación, que corresponde al clon de Cavendish, el cual es considerablemente apetecido en el comercio exterior debido a sus características favorables que suplen la seguridad alimentaria y calidad organoléptica aceptada por los consumidores internacionales (10), lo que conlleva que este producto ocupe a nivel nacional el tercer lugar en exportación (4,11). Para Colombia, la relevancia económica del banano es equiparable a otros renglones de la economía colombiana, debido a que aporta al PIB nacional en conjunto con la producción de café, flores, caña de azúcar, ganado y arroz (4, 11).

Por otra parte, en el país las cadenas exportadoras que intervienen en el proceso de envío del banano a mercados internacionales son: la Asociación de Bananeros de Colombia (AUGURA) y la Asociación de Bananeros del Magdalena (ASBAMA), integrado por productores individuales y agremiados (12, 13) y las compañías comercializadoras como: Unión de Bananeros de Urabá S.A. (UNIBAN), Técnicas Baltime de Colombia S.A. (Técbaco

S.A.), Comercializadora Internacional de banano domiciliada en Santa Marta – Colombia (Banasan S.A) (14). Estos procesos de comercialización abarcan toda la cadena de producción de un cultivo, lo que optimiza parámetros de selección en la cosecha, bajo estándares de calidad y cantidad (15). Debido a esto, los distintos actores involucrados en el proceso del comercio bananero en Colombia han buscado tradicionalmente reducir la pérdida o desperdicios del fruto, con el fin de aumentar sus ganancias e ingresos, lo que aporta a la creación de soberanía alimentaria (16).

Sin embargo, hay una serie de factores adversos que interfieren en estos procesos; entre ellos, los problemas fitosanitarios, son uno de los factores más limitantes para productores y comercializadores de banano, en especial, el marchitamiento del banano o mal de panamá causado por poblaciones de *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* (17, 18). A nivel mundial, aproximadamente 135 países se encuentran dedicados a la producción de banano, generando ganancias cercanas a los \$52 mil millones de dólares anuales (19). Esta actividad agrícola denota la importancia económica del cultivo, no solo para los países que se dedican a su producción sino también para la economía a nivel mundial (19). El género *Fusarium* es conocido por causar la marchitez en banano y puede ocasionar pérdidas en el rendimiento de hasta el 100% una vez se establece el hongo en campo, conllevando a una disminución en la producción de frutos y graves pérdidas para los agricultores que se dedican a su producción (19).

Actualmente se conocen cuatro (4) razas tropicales (RT) de *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* (*Foc*) que ocasionan el mal de panamá en plantas del género *Musa*, de las cuales dos pueden afectar clones de banano: la raza tropical 1 (*Foc* R1T) la cual es virulenta principalmente a los clones de banano Silk, Gros Michel, y otros (20), y la raza tropical 4 (*Foc* R4T) o conocida actualmente como *Fusarium odoratissimum*, la cual es considerada la más agresiva de todas debido a que afecta clones de banano del grupo Cavendish, Silk y otros clones de banano y plátano afectados por *Foc* R1T y *Foc* R2T (20).

Foc R4T o *F. odoratissimum*, ha ocasionado pérdidas en la producción de banano desde 1970, siendo que a pocos años de su aparición se reportaron cifras alarmantes de pérdidas en países como Filipinas, donde ocurrió la afectación de alrededor de 15.700

hectáreas de plantaciones de banano, y en China, con pérdidas de hasta el 70% de las plantaciones en las provincias de Guangdong y Hainan (21). En Mozambique, la presencia de este hongo causó enormes pérdidas y daños en al menos 1.500 hectáreas, durante un periodo de 4 años desde que apareció por primera vez (21). Actualmente, *F. odoratissimum* se encuentra presente en 20 países productores de banano, afectando, en especial, a clones de la variedad Cavendish (22).

Dada la rápida propagación y diseminación de este fitopatógeno, en varios países ha sido motivo de preocupación, con especial énfasis en América Latina y el Caribe debido a que de las 2.23 millones de hectáreas sembradas, 1.13 millones de estas producen clones de Cavendish aportando en un 28% a la producción mundial y de cuya producción el 80% se exporta (23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 20). En Colombia, en junio del 2019 se detectó por primera vez *F. odoratissimum* en el nororiente de la Guajira (Dibulla y Riohacha) (26), causando una gran alarma para la industria exportadora de bananos, pues su presencia es una amenaza fitosanitaria que puede causar pérdidas significativas a este sector productivo (27, 28, 29, 30).

F. odoratissimum es un patógeno que se caracteriza por la capacidad de formar estructuras resistentes a las condiciones de estrés ambiental, llamadas clamidosporas (31,32). Estas estructuras son comúnmente formadas durante condiciones de estrés ambiental para el hongo y le permiten al mismo sobrevivir durante largo períodos de tiempo en los residuos vegetales del cultivo y/o en el suelo (31,32). Por otro lado, otro aspecto relevante sobre *F. odoratissimum* es la capacidad que tiene de colonizar rápidamente la zona vascular de las raíces laterales de las musáceas, ocasionando la degeneración del rizoma, obstrucción de vasos de xilema e interferencia en la absorción de agua y nutrientes, afectando así la translocación de estos hacia las hojas y el pseudotallo (33). Durante el ciclo de la enfermedad, a los 17 días se puede observar la colonización de las hifas en el pseudotallo, y a partir de los 24 días la planta muere (33).

Los síntomas se manifiestan inicialmente en la presencia de hojas con clorosis en los bordes, seguido por el colapso gradual de toda el área foliar, en donde se observan las hojas pegadas al pseudotallo (34). El pseudotallo a su vez puede desarrollar grietas longitudinales

limitando el crecimiento y desarrollo, y los frutos presentan un menor tamaño como consecuencia de las alteraciones fisiológicas en la planta (34). En vista de las limitantes ocasionadas por *F. odoratissimum*, los productores de banano han implementado “Buenas Prácticas agrícolas (BPA)” en la gestión de sus cultivos, pero estas no han logrado tener un impacto biocontrolador o que mitigue los daños causados por estos hongos en la producción y comercio mundial del banano (35,36).

De este modo, este artículo tiene como propósito brindar una revisión acerca de la importancia de la comercialización del cultivo de banano en Colombia e identificar como el patógeno *Foc R4T* afecta los procesos asociados a la producción de banano en diferentes regiones productoras de este importante renglón agrícola para el país.

Materiales y métodos

Las fuentes de datos utilizadas para la revisión bibliográfica fueron a partir de recursos abiertos, que comprenden revistas, repositorios, informes, conferencias, órganos administrativos nacionales (Minagricultura), entidades públicas nacionales (ICA) y bases de datos de información bibliográfica. El criterio de búsqueda que se aplicó se enmarcó en publicaciones (español e inglés) con base en calidad científica de los últimos 5 años con el propósito de generar una actualización en un tema de interés para el sector agroindustrial bananero; las publicaciones se escogieron por fechas y disponibilidad.

Resultados

La revisión bibliográfica sobre la importancia de la comercialización del banano (*Musa x paradisiaca*) en Colombia y como *Foc R4T* ha afectado este proceso identificó 39 textos relevantes sobre la temática en mención, destacándose en síntesis las referencias de los últimos cinco años (Tabla 1):

Tabla 1. Principales referencias bibliográficas seleccionadas por su relevancia en la información sobre comercialización del banano (*Musa x paradisiaca*) en Colombia y *Foc* R4T.

Título	Autor	Fecha
Banana. Market Review 2023	FAO	2023
Boletín estadístico. Tráfico portuario en Colombia.	Ministerio de Transporte.	2023
<i>Fusarium</i> R4T	ICA.	2023
FAOSTAT	FAO	2023
Cadena de Banano	Minagricultura	2021
Plátano. Sistema de información de Gestión y desempeño de organizaciones de cadena.	Minagricultura	2021
Contexto macroeconómico de Colombia	Mincomercio	2021
Perspectivas a mediano plazo. Perspectivas para la producción y el comercio mundial de bananos y frutas tropicales 2019-2028. Organización de las Naciones Unidas para la alimentación y la agricultura.	FAO	2020
Cadena de banano. Documento 2019	Minagricultura	2020
Análisis del mercado del banano. Resultados preliminares 2019.	FAO	2020
<i>Fusarium</i> wilt by tropical race 4: Current status and presence in the American continent. Agron Mesoamerican	Martínez-Solórzano GE, Rey-Brina JC, Pargas-Pichardo RE, Enrique-Manzanilla E	2020
Cadena de banano Documento 2020	Minagricultura	2020
Mal de Panamá en Banano (<i>Fusarium oxysporum</i> sp. <i>cubense</i>).	Guzm, M, Dita, M.	2020
Molecular and Biological Characterization of the First Hypovirus Identified in <i>Fusarium oxysporum</i> .	Torres-Trenas, A., Cañizares, M. C., García-Pedrajas, M. D., & Pérez-Artés, E.	2020
Agenda para la prevención y el manejo de brotes de la raza 4 tropical de <i>Fusarium</i> (R4T) en el cultivo de musáceas en América Latina y el Caribe (ALC).	Betancourt, M., Dita, M., Saini, E., & Salazar, L.	2020
Characterization and incidence of the first member of the genus mitovirus identified in the phytopathogenic species <i>Fusarium oxysporum</i> .	Torres-Trenas, A., & Pérez-Artés, E.	2020
Hadaka virus 1: A capsidless eleven-segmented positive-sense single-stranded RNA virus from a phytopathogenic fungus, <i>Fusarium oxysporum</i> .	Sato, Y., Shamsi, W., Jamal, A., Bhatti, M. F., Kondo, H., Suzuki, N., & Wickner, R. B.	2020
Nitric oxide improves tolerance to <i>Fusarium oxysporum</i> f. sp. <i>cubense</i> Tropical Race 4 in banana.	Nasir NNM, Ho CL, Lamasudin DU, Saidi NB.	2020

Taller Técnico: “Agenda de investigación para la exclusión, prevención y manejo de brotes de la raza 4 tropical de <i>Fusarium</i> (R4T) en el cultivo de Musáceas de América Latina y el Caribe (ALC).”	Banco Interamericano de Desarrollo.	2019
Phylogeny and genetic diversity of the banana <i>Fusarium</i> wilt pathogen <i>Fusarium oxysporum</i> f. sp. <i>cubense</i> in the Indonesian centre of origin.	Maryani N, Lombard L, Poerba YS, Subandiyah S, Crous PW, Kema GHJ.	2019
La marchitez del banano por <i>Fusarium</i> Raza 4 Tropical: ¿Una creciente amenaza al mercado mundial del banano?	FAO	2019
Las exportaciones de plátano como una estrategia de desarrollo rural en Colombia.	Carvajal-García M, Zuluaga-Arango P, Ocampo-López OL, Duque-Gómez D.	2019
Phylogeny and genetic diversity of the banana <i>Fusarium</i> wilt pathogen <i>Fusarium oxysporum</i> f. sp. <i>cubense</i> in the Indonesian centre of origin.	Maryani N, Lombard L, Poerba YS, Subandiyah S, Crous PW, Kema GHJ.	2019
La marchitez del banano por <i>Fusarium</i> Raza 4 Tropical: ¿Una creciente amenaza al mercado mundial del banano?	FAO	2019
Biological control agents against <i>Fusarium</i> wilt of banana.	Bubici G, Kaushal M, Prigigallo MI, Cabanás CGL	2019
First report of <i>Fusarium</i> wilt Tropical Race 4 in Cavendish bananas caused by <i>Fusarium odoratissimum</i> in Colombia.	García-Bastidas, F., J. Quintero-Vargas, M. Ayala-Vasquez, T. Schermer, M. Seidl, M. Santos-Paiva, A.M. Noguera, C. AguileraGalvez, A. Wittenberg, A. Sørensen, R. Hofstede, and G.H.J. Kema.	2019
ICA amplía y refuerza las medidas, que ya venía implementando, para atender la presencia de <i>Fusarium</i> R4T en cultivos de banano en La Guajira.	ICA	2019
Colombia confirms that dreaded fungus has hit its banana plantations. American Association for the Advancement of Science, NY, USA. 2019.	Galvis, S.	2019
<i>Fusarium oxysporum</i> f. sp. <i>cubense</i> RT4. El mayor enemigo de las musáceas parece haber llegado al continente americano.	Rodríguez, M.	2019
Marchitez por <i>Fusarium</i> raza tropical 4: Estado actual y presencia en el continente americano.	Martínez-Solórzano GE, Rey-Brina JC, Pargas-Pichardo RE, Manzanilla EE	2019
Augura intensificó medidas de control y prevención ante sospecha de presencia del hongo <i>Fusarium</i> R4T en Colombia alertado por el ICA.	AUGURA	2019

Factores que afectan la producción de banano de la hacienda " Nuevo Porvenir de la Unión	Alvario-Castro, S.	2019
Tropical race 4	Vézina, A.	2019
Molecular Diagnostics of Banana <i>Fusarium</i> Wilt Targeting Secreted-in-Xylem Genes.	Carvalhais LC, Henderson J, Rincon-Florez VA, O'Dwyer C, Czulowski E, Aitken EAB, Drenth A.	2019
El mayor enemigo de las musáceas parece haber llegado al continente americano.	Rodríguez, M.	2019
The Epidemiology of <i>Fusarium</i> Wilt of Banana.	Pegg KG, Coates LM, O'Neill WT, Turner DW.	2019
<i>Fusarium</i> Raza 4 Tropical.	Cedeño.	2019
Panama disease in banana: Spread, screens and genes. (Doctoral dissertation).	García-Bastidas, F. A.	2019
Mycovirus <i>fusarium oxysporum</i> f. sp. <i>dianthi</i> virus 1 decreases the colonizing efficiency of its fungal host.	Torres-Trenas A, Prieto P, Cañizares MC, García-Pedrajas MD, Pérez-Artés E.	2019

Discusión

Importancia del cultivo del banano para Colombia y los mercados internacionales

El banano es un cultivo tropical de importancia para la economía de los países dedicados a la producción de esta fruta, debido a la fuente de empleo e ingresos que genera su comercialización (37). Este aspecto, ha llegado a ser tan relevante, que las plantaciones bananeras con enfoque de exportación representan el 15% de la producción de frutas en el mundo (38). En Colombia, las plantaciones de banano con un enfoque comercial comenzaron a finales del siglo XIX, cuando las transnacionales llegaron al departamento del Magdalena y posteriormente a la región del Urabá antioqueño con el objetivo de manejar la cadena productiva y comercial a nivel nacional (39).

Debido a que el país cuenta con favorables condiciones climáticas que benefician la producción agrícola, como el banano tipo exportación, esta fruta ocupa el tercer lugar en los productos agrícolas exportables del país, después del café y el cultivo de las flores, representando el 65% del total de exportaciones agrarias del país, debido a su alta demanda en los mercados internacionales (39). Esta dinámica exportadora generó que, en 2019, Colombia exportara banano a 42 países y en el 2020, se consolidó el mercado belga como

el principal país destino de exportaciones bananeras, contribuyendo con el 22% del mercado nacional, con envíos aproximados en el orden de 85.868 toneladas (40).

El nivel observado de productividad de la cadena bananera en general ha aumentado con el paso de los años; no obstante, hay una serie de factores que afectan su producción y comercialización en Colombia entre los cuales se destacan: la deficiencia en la optimización de los recursos, la falta de adaptabilidad a los cambios tecnológicos, el mal manejo administrativo, las malas condiciones de infraestructura vial, los casos fortuitos de la naturaleza, el control de malezas, plagas y enfermedades que causan patógenos como *F. odoratissimum* (41, 42, 43). Actualmente, las afectaciones por *F. odoratissimum* son un factor relevante que genera importantes pérdidas en el cultivo del clon Cavendish de banano debido a la ausencia o pocas medidas de control fitosanitario (41, 42, 43).

Origen y surgimiento de *F. odoratissimum* raza 4 en banano

El mal de Panamá o marchitez por fusariosis es causado por el hongo *Fusarium odoratissimum*. Este fitopatógeno se caracteriza por ser habitante del suelo y sobrevivir en la materia orgánica restante o en los restos del cultivo de banano, y que, además, durante su ciclo de vida puede llegar a producir estructuras especializadas de sobrevivencia llamadas clamidosporas, las cuales pueden llegar a subsistir en el suelo de forma latente durante varios años (44, 45, 46).

La marchitez por *Fusarium oxysporum* f.sp *cubense* (FOC), fue reportada por primera vez a finales del siglo XIX, en una plantación de banano de Australia (47). A partir de ese momento, la enfermedad empezó a dispersarse hacia otras plantaciones de banano, y más tarde, hacia 1910, se informa la presencia del hongo en América Latina, específicamente en Cuba; de ahí que su epíteto específico sea *cubense* (18, 48, 49). La historia de la llegada de *Fusarium* a plantaciones de banano Gross Michel a América Latina, trajo como consecuencia la erradicación de miles de hectáreas del cultivo, lo que generó pérdidas económicas importantes (50).

Hasta la fecha, se han reportado cuatro razas de *Fusarium oxysporum* f.sp *cubense* (Foc) atacando de forma diferencial plantas del género *Musa* (20). Una de las primeras razas detectadas a nivel mundial fue la Foc raza tropical 1 (Foc R1T), la cual impactó la industria

bananera basada en la variedad Gros Michel (20). Por ejemplo, en América central, Foc R1T provocó la destrucción entre los años 50 y 60 de más de 379.000 hectáreas de la empresa United Fruit (51). Como respuesta a esta problemática, se empezaron a implementar cultivares de bananos Cavendish resistentes a Foc R1T en la mayoría de las zonas productoras de banano, lo que conllevó con el tiempo a que estas plantaciones se convirtieran en grandes extensiones de monocultivo, propiciando el surgimiento de una nueva raza, Foc R4T o *F. odoratissimum*, con capacidad de generar marchitez a gran escala y con mayor rapidez en los cultivares de Cavendish (18,48,52).

Esta nueva raza del patógeno se originó en Taiwán en 1970, ocasionando pérdidas de 4.000 ha en un mismo año (50). El patógeno se continuó diseminando por el mundo hasta llegar a Colombia en el 2019 (26, 48, 52). El surgimiento de nuevas razas en hongos fitopatógenos ha sido atribuido a diferentes mecanismos de variabilidad y recombinación genética que promueven y favorecen la aparición de variantes fúngicas más agresivas o virulentas (53). Algunos de estos mecanismos biológicos pueden ser promovidos por eventos que conllevan a la recombinación de genes como la reproducción sexual (54), anastomosis entre hifas, formación de tubos de anastomosis entre conidios o CATS (55) y ciclo parasexual (56, 54).

En el caso de *F. odoratissimum*, la formación de grupos de compatibilidad vegetativa (GCV) ha sido uno de los mecanismos que le ha permitido a este hongo generar poblaciones genéticamente variables, sin involucrar la formación de una fase sexual (57; 58). Los grupos de variabilidad vegetativa (GCV) consisten en diferentes aislados de un hongo que tiene la capacidad de fusionar sus hifas entre sí de una manera estable, formando en el punto de unión una célula llamada heterocarion (56, 54). El heterocarion que contiene los núcleos provenientes de los individuos implicados en la formación del GCV, tiene la capacidad de desarrollarse vegetativamente y expresar los genes de los diferentes aislados parentales, o bien puede ocurrir en su interior la fusión de los núcleos dando paso al ciclo parasexual (56, 54). Tanto la formación de un heterocarion como el ciclo parasexual, da paso al surgimiento de nuevas poblaciones variables (55).

Estos individuos formados a partir de heterokaryons o del ciclo parasexual, pueden tener sus propias características morfológicas, de virulencia y agresividad diferentes a los parentales (59). De este modo, se presume que estos eventos de recombinación podrían estar favoreciendo el surgimiento de poblaciones más virulentas de patógenos como *F. odoratissimum* (57,58,60). Se ha reportado que los cultivares de Cavendish son resistentes a la raza 1 y 2, sin embargo, no tienen resistencia a la raza 4, lo que representa un nuevo desafío para la cadena productiva del cultivo (22).

Patogenicidad de *F. odoratissimum* en banano, variedad Cavendish

La marchitez por *F. odoratissimum* se caracteriza por ser una enfermedad cuyo síntoma empieza a manifestarse por un amarillamiento en el borde de las hojas viejas que se va extendiendo a las hojas más jóvenes, las cuales colapsan quedando colgadas a modo de “enruanamiento” en la base de la nervadura central del pseudotallo. Así, la lámina foliar reduce su tamaño y se deforma; en consecuencia, las plantas se ven afectadas en la producción de los fotoasimilados necesarios para el desarrollo vegetativo y la producción de frutos, especialmente, en la variedad Cavendish (45).

Por otro lado, el patógeno coloniza haces vasculares causando la oclusión de los tejidos del xilema y la obstrucción en la traslocación de agua y nutrientes de la raíz al resto de la planta (61). La sintomatología en las plantas afectadas se observa como decoloraciones marrones y rojizas en rizomas y al interior de los vasos vasculares del pseudotallo; externamente, el pseudotallo de las plantas presenta clorosis, que puede expandirse en todo el tejido, hasta agrietarlo (61) y, finalmente, producir la muerte celular de tejidos antes de la producción de racimos (62). Aunque no se han observado síntomas directos en el fruto, generalmente puede ocurrir una reducción del tamaño de estos como consecuencia de los daños causados por la enfermedad en otros órganos de la planta (64).

Impacto de *F. odoratissimum* en la cadena productiva y comercial del banano

En los últimos años, la marchitez por *F. odoratissimum* es la principal enfermedad que amenaza la producción global del banano, debido a que se ha extendido en diversas regiones de Asia, África y América Latina, lo que ha generado la necesidad de implementar

planes de control y contingencia antes ese problema (48). Cabe resaltar que este hongo fitopatógeno no solo amenaza la producción mundial de los cultivares de Cavendish, sino que también amenaza con destruir las plantaciones de cultivares locales destinados al consumo doméstico, entre las que se encuentran otras variedades de plátanos como AAB, bananos de cocción tipo Bluggoe (ABB), bananos Gros Michel (AAA), Prata (AAB) y manzano (AAB), importantes para la seguridad alimentaria y económica de países en vía de desarrollo (52; 63, 25). Este aspecto toma mayor relevancia considerando que en la actualidad, no existen variedades que sean internacionalmente aceptadas y que puedan reemplazar clones de la variedad Cavendish, por lo cual las alternativas de manejo del patógeno resultan limitadas e incipientes (34).

Principales estrategias de control para *F. odoratissimum*

En Colombia, el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA) junto con el apoyo de las cadenas exportadoras bananeras AUGURA y ASBAMA, han puesto en práctica planes de acción para la prevención de *F. odoratissimum* en las plantaciones de banano de los principales departamentos productores (65). Entre estas estrategias se cuentan: la sensibilización, capacitación, reconocimiento, actividades de vigilancia fitosanitaria y protocolos de bioseguridad para la detección en campo de esta enfermedad (65). Para llevar a cabo estas estrategias es importante resaltar la identificación de la sintomatología de la enfermedad en los cultivos de banano (65). Internamente en el pseudotallo, la coloración rojiza es la principal característica y externamente, la presencia de clorosis y la dobladez de la base de la nervadura, que puede expandirse en todo el tejido, hasta agrietarlo (61,45).

El manejo de *F. odoratissimum* es limitado y no se ha establecido a gran escala medidas biológicas, químicas o culturales efectivas, dado que todos los métodos de control se limitan a investigaciones científicas, o se ha optado por realizar cuarentenas en zonas con presencia del hongo (64), la implementación de programas de contingencia y concientización en la comunidad con el objetivo de capacitarlos sobre la sintomatología de la enfermedad y el impacto social y económico que causa (64).

Entre los métodos de control de la enfermedad, los que han demostrado resultados prometedores se destacan:

- **Control cultural:** Actualmente, las medidas de contingencia del hongo se basan en aplicar medidas de bioseguridad, destrucción rápida de las plantas infectadas y restricciones de entrada en las plantaciones productivas, así como la detección temprana de la enfermedad (66).
- **Control biológico:** El uso de *Bacillus* spp. y *Pseudomonas* spp., han mostrado avances prometedores como uso potencial de bacterias antagónicas endofíticas, las cuales incrementan la diversidad bacteriana en las plantas infectadas a manera de resistencia frente al fitopatógeno (67). Por otro lado, se han venido estudiando otras alternativas promisorias como el uso de Micovirus para el control de *Fusarium*, las cuales en un futuro podrían funcionar para el control de *F. odoratissimum* (68, 69, 70, 71, 72). Los micovirus son virus que establecen infecciones latentes en el hongo hospedero, pudiendo conllevar a una hipovirulencia del mismo, inhibiendo la capacidad de crecimiento, desarrollo y dispersión del hongo fitopatógeno (68). Entre los estudios en el control de *F. oxysporum* se destacan los realizados con los micovirus *Fusarium oxysporum* f. sp. *dianthi* virus (FodV1) (68), *Fusarium oxysporum* f. sp. *Melonis* (FuOMV) (69), *Fusarium oxysporum* f. sp. *dianthi* hypovirus 2 (FodHV2) (70), Virus Hadaka 1 (HadV1) (71) y *Fusarium oxysporum* f. sp. *dianthi* mitovirus 1 (FodMV1) (72).
- **Control químico:** En investigaciones realizadas bajo condiciones de laboratorio se demostró que los fungicidas procloraz y propiconazol inhiben el crecimiento del micelio de *F. odoratissimum* (73). Aplicaciones con procloraz, propiconazol y cyproconazol reducen significativamente la severidad de la enfermedad en las plantas y finalmente, la aplicación de sales cuaternarias previene la reproducción y propagación de las esporas asexuales del hongo (conidios) (73).
- **Inducción de resistencia:** El óxido nítrico (ON), es una molécula de señalización que actúa como un modulador que interactúa con otras moléculas durante los mecanismos de defensa de la planta, mejorando así la tolerancia del banano a *F. odoratissimum* (74). El modo de acción se basa en la utilización de la proteína llamada “S-nitrosilación” como

regulador predominante del óxido nítrico, la cual tiene la capacidad de actuar inhibiendo el crecimiento y desarrollo del patógeno en la planta; de esta manera, retrasa el metabolismo del fitopatógeno (74).

Conclusiones

El cultivo de banano constituye un renglón de gran interés socioeconómico; esto se debe a la gran importancia que tiene desde el punto de vista de la seguridad alimentaria, la generación de empleo y como un cultivo capitalizador en la economía de países en vía de desarrollo (37). En Colombia, el banano es uno de los principales cultivos dedicados a la producción con un consumo criollo predominantemente en fresco y de comercialización internacional inmediata manejando cultivares Cavendish (10). En el proceso de producción y comercialización del banano hay una serie de limitantes que interfieren en este proceso, entre ellas afectaciones por *F. odoratissimum*, el cual es un patógeno sumamente agresivo, con capacidad de atacar diferentes plantas del género *Musa*, destacando las elevadas pérdidas que ocasiona en clones de banano tipo Cavendish (20).

A la fecha no existen estrategias de control contundentes de *F. odoratissimum*, sin embargo, se han venido explorando e implementando diferentes estrategias que pretenden disminuir las pérdidas ocasionadas por este patógeno: estrategias como la capacitación de la comunidad para el diagnóstico oportuno de la enfermedad (65), establecimiento de estatutos fitosanitarios que permitan establecer medidas de cuarentena y control de zonas infestadas (45), la implementación de microorganismos biocontroladores como bacterias (67) y micovirus (68, 69, 70, 71, 72), la aplicación de inductores de resistencia que mejoren las respuestas de defensa de las plantas (74) y la búsqueda de genes de resistencia para implementar programas de fitomejoramiento en banano (74).

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad de Cundinamarca, por facilitar el acceso a las bases de datos para la búsqueda del material bibliográfico utilizado en la construcción del presente artículo.

Declaración de divulgación

Los autores declaran que no existe ningún potencial conflicto de interés relacionado con el artículo. No se emplearon herramientas de generación de contenido por inteligencia artificial para la elaboración del artículo.

Financiamiento

Los autores no declaran fuente de financiamiento para la realización de este artículo.

Referencias

1. FAO. Banana. Market Review 2023 [Internet]. Roma: FAO; 2023. Disponible en: <https://tinyurl.com/44shz9dz>
2. FAO. Perspectivas a mediano plazo. Perspectivas para la producción y el comercio mundial de bananos y frutas tropicales 2019-2028. Roma: Organización de Las Naciones Unidas Para La Alimentación y La Agricultura; 2020.
3. FAO. FAOSTAT Online Database [Internet]. 2022 [citado febrero de 2023]. Disponible en: <http://faostat.fao.org/>
4. Banco Interamericano de Desarrollo. Taller Técnico: “Agenda de investigación para la exclusión, prevención y manejo de brotes de la raza 4 tropical de *Fusarium* (R4T) en el cultivo de Musáceas de América Latina y el Caribe (ALC).” 2019.
5. FAO. Banano. Análisis del mercado 2022. 2023.
6. Minagricultura. Cadena De Banano. Cifras Sectoriales [Internet]. 2021. Disponible en: <https://tinyurl.com/444jfwr4>
7. Montoya RB. Política comercial agrícola: nivel, costos y efectos de la protección en Colombia [Internet]. Bogotá: Fedesarrollo; 2018.
8. Minagricultura. Plátano. Sistema de Información de Gestión y desempeño de organizaciones de cadena [Internet]. 2021. Disponible en: <https://tinyurl.com/4cc47rum>
9. Minagricultura. Cadena De Banano. Cifras Sectoriales [Internet]. 2020. Disponible en: <https://tinyurl.com/mry7426p>
10. Organizaciones Sindicales Rurales. Plantaciones y/o unidades de producción de banano en Colombia. Lima: Organización Internacional del Trabajo; 2018.
11. Mincomercio. Contexto macroeconómico de Colombia. Oficina de Estudios Económicos [Internet]. 2021. Disponible en: <https://tinyurl.com/f6snkfas>
12. Bolaño A, De Vengoechea JM, Ignacio F, Granados J, Riad D, et al. Principal Revisor Fiscal Centro de Estudios del Banano. 2016.
13. Vargas A, Watler W, Morales M, Vignola R. Ficha técnica cultivo de banano. Catie [Internet]. 2017;2(21):1–56.
14. Comisión Intereclesial de Justicia y Paz. Empresas bananeras: Vulneración de derechos humanos y narcotráfico en el Bajo Atrato. 2016.

15. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). Manual 5: El Mercado y la Comercialización. Gestión Empresarial táctica y Operativa. 2018.
16. ONU. Banano. Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Comercio y Desarrollo UNCTAD [Internet]. 2016.
17. Departamento Administrativo Nacional de Estadística [DANE]. Enfermedades y plagas del plátano (*Musa paradisiaca*) y el banano (*Musa acuminata*; *M sapientum*) en Colombia. Boletín Mensual Insumos y Factores Asociados a La Producción Agropecuaria. 2016;51:1-115.
18. Maryani N, Lombard L, Poerba YS, Subandiyah S, Crous PW, Kema GHJ. Phylogeny and genetic diversity of the banana *Fusarium* wilt pathogen *Fusarium oxysporum* f. sp. *ubense* in the Indonesian centre of origin. *Stud Mycol.* 2019;92:155-94.
19. FAO. Global programme on banana *Fusarium* wilt disease. 2017.
20. Martínez-Solórzano GE, Rey-Brina JC, Pargas-Pichardo RE, Manzanilla EE. Marchitez por *Fusarium* raza tropical 4: Estado actual y presencia en el continente americano. *Agron Mesoam.* 2019;31(1):259-76.
21. FAO. La marchitez del banano por *Fusarium* Raza 4 Tropical: ¿Una creciente amenaza al mercado mundial del banano? [Internet]. 2019.
22. Martínez-Solórzano GE, Rey-Brina JC, Pargas-Pichardo RE, Enrique-Manzanilla E. *Fusarium* wilt by tropical race 4: Current status and presence in the American continent. *Agron Mesoam.* 2020;31(1):259-76.
23. Bubici G, Kaushal M, Prigigallo MI, Gómez-Lama Cabanás C, Mercado-Blanco J. Biological control agents against *Fusarium* wilt of banana. *Front Microbiol.* 2019;10:616.
24. Giles BE, Ericson L, Carlsson-Granér U. Plant Disease. *Encycl Islands.* 2020;104(3):747-52.
25. Zheng S, Kema GHJ. New Geographical Insights of the Latest Expansion of *Fusarium oxysporum* f. sp. *ubense* Tropical Race 4 Into the Greater Mekong Subregion. *Front Plant Sci.* 2018;9:457.
26. García-Bastidas F, Quintero-Vargas J, Ayala-Vasquez M, Schermer T, Seidl M, Santos-Paiva M, et al. First report of *Fusarium* wilt Tropical Race 4 in Cavendish bananas caused by *Fusarium odoratissimum* in Colombia. *Plant Dis.* 2019.
27. ICA. ICA amplía y refuerza las medidas, que ya venía implementando, para atender la presencia de *Fusarium* R4T en cultivos de banano en La Guajira. ICA, COL. 2019.
28. Galvis S. Colombia confirms that dreaded fungus has hit its banana plantations. *Science.* 2019.
29. Rodríguez M. *Fusarium oxysporum* f. sp. *ubense* RT4. El mayor enemigo de las musáceas parece haber llegado al continente americano. *CropLife*, San José, CRI. 2019.
30. AUGURA. Augura intensificó medidas de control y prevención ante sospecha de presencia del hongo *Fusarium* R4T en Colombia alertado por el ICA. AUGURA, COL. 2019.
31. Dita M, Barquero M, Heck D, Mizubuti ESG, Staver CP. *Fusarium* wilt of banana: Current knowledge on epidemiology and research needs toward sustainable disease management. *Front Plant Sci.* 2018;9:1468.
32. Warman NM, Aitken EAB. The movement of *Fusarium oxysporum* f.sp. *ubense* (sub-tropical race 4) in susceptible cultivars of banana. *Front Plant Sci.* 2018;9:1748.
33. Li C, Yang J, Li W, Sun J, Peng M. Direct root penetration and rhizome vascular colonization by *Fusarium oxysporum* f. sp. *ubense* are the key steps in the successful infection of Brazil Cavendish. *Plant Dis.* 2017;101:2073-8.

34. Ploetz RC. *Fusarium* wilt of banana. *Phytopathology*. 2015;105(12):1512–21.
35. FAO. Manual de Buenas Prácticas Agrícolas para el Productor Hortofrutícola 2 Edición [Internet]. 2012.
36. FAO. Análisis del mercado del banano: resultados preliminares 2019. *Panor Gen* febrero 2020 [Internet]. 2020.
37. Betancurth YC, Milena S, Tobar M. Evaluación financiera del cultivo de banano usando semilla in vitro 1 [Internet]. 2017.
38. Yap M, Fernando WMADB, Brennan CS, Jayasena V, Coorey R. The effects of banana ripeness on quality indices for puree production. *LWT - Food Sci Technol*. 2017;80:10–8.
39. Elías-Caro JE. El Banco Bananero del Magdalena (Colombia) y el Holding gremial: Iniciativa sectorial-regional imperiosa, práctica empresarial fallida, 1958-1977. *Rev Digit Hist Arqueol desde el Caribe*. 2016;(28):263-303.
40. Minagricultura. Cadena de banano [Internet]. 2020.
41. Alvario-Castro S. Factores que afectan la producción de banano de la hacienda “Nuevo Porvenir de la Unión”. 2019.
42. FAO. Situación del mercado del banano 2015-16. 2016.
43. Ministerio de Transporte. Boletín estadístico. tráfico portuario en Colombia. 2023.
44. ICA. Conozca la enfermedad que destruye los cultivos de banano y plátano: Marchitamiento por *Fusarium* RT-4. 2018.
45. ICA. *Fusarium* R4T [Internet]. 2023. Disponible en: <https://www.ica.gov.co/icacomunica/pyp/fusarium-r4t>
46. Guzmán M, Dita M. Mal de Panamá en Banano (*Fusarium oxysporum* sp. *cubense*). 2020.
47. Stover RH. Fusarial wilt (Panama Disease) of bananas and other Musa species. Kew, Surrey: Commonwealth Mycological Institute; 1962.
48. Ordoñez N, Seidl MF, Waalwijk C, Drenth A, Kilian A, Thomma BPHJ, et al. Worse Comes to Worst: Bananas and Panama Disease—When Plant and Pathogen Clones Meet. *PLoS Pathog*. 2015;11(11):e1005197.
49. Pérez V, Batlle AL, Chacón JB, Montenegro V. Reaction of natural and hybrids cultivars of FHIA Bananas and Plantains to Cuban *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* Populations, causal agent of Fusarium Wilt or Panama Disease. *Fitosanidad*. 2009;13(4):237-41.
50. Vézina A. Tropical race 4 [Internet]. 2019 [citado 7 de junio de 2021]. Disponible en: <http://www.promusa.org/Tropical+race+4+-+TR4>
51. Stover RH. Banana, plantain and abaca diseases. Kew, UK: Commonwealth Mycological Institute; 1972. 316 p.
52. Dita R, Echegoyén R, Pérez V. Plan de contingencia ante un brote de la raza 4 Tropical de *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense*. 2017.
53. Betancourt M, Dita M, Saini E, Salazar L. Agenda para la prevención y el manejo de brotes de la raza 4 tropical de *Fusarium* (R4T) en el cultivo de musáceas en América Latina y el Caribe (ALC). Banco Interamericano de Desarrollo. 2020;8:5.
54. Glass NL, Jacobson DJ, Shiu PK. The genetics of hyphal fusion and vegetative incompatibility in filamentous ascomycetes. *Annu Rev Genet*. 2000;34:165–86.

55. Ishikawa FH, Souza EA, Shoji J, Connolly L, Freitag M, Read ND, et al. Heterokaryon incompatibility is supresses following conidial anastomosis tube fusion in fungal plant pathogen. Plos One. 2012;7(2):e31842.
56. Caten CE, Jinks JL. Heterokaryosis: its significance in wild homothallic ascomycetes and fungi imperfecti. Trans Br Mycol Soc. 1966;49:81–93.
57. Fourie G, Steenkamp ET, Gordon TR, Viljoen A. Evolutionary relationships among the *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* vegetative compatibility groups. Appl Environ Microbiol. 2009;75:4770–81.
58. Carvalhais LC, Henderson J, Rincon-Florez VA, O'Dwyer C, Czislowski E, Aitken EAB, et al. Molecular Diagnostics of Banana *Fusarium* Wilt Targeting Secreted-in-Xylem Genes. Front Plant Sci. 2019;10:547.
59. Hermanto C, Sutanto A, Jumjunidang, Edison HS, Daniells JW, O'Neill WT, et al. Incidence and distribution of *Fusarium* wilt disease of banana in Indonesia. Acta Hortic. 2011;897:313–22.
60. Paul S, et al. Grupos de compatibilidad vegetativa de las poblaciones de *Fusarium oxysporum* f. sp. *Cubense* en Vietnam. 1995;10:32-3.
61. Pegg KG, Coates LM, O'Neill WT, Turner DW. The Epidemiology of *Fusarium* Wilt of Banana. Front Plant Sci. 2019;10:1395.
62. Cedeño. *Fusarium* Raza 4 Tropical [Internet]. 2019. Disponible en: <https://tinyurl.com/36fj9c52>
63. García-Bastidas FA. Panama disease in banana: Spread, screens and genes [Tesis doctoral]. Wageningen University; 2019.
64. Ploetz RC. Management of *Fusarium* wilt of banana: A review with special reference to tropical race 4. Crop Prot. 2015;73:7–15.
65. Peñaranda EA, Catalina J, Vargas Q, Eliecer J, Acosta V, José A, et al. Acciones estratégicas para la prevención de *Fusarium* Raza 4 Tropical (Foc R4T) en el Caribe Colombiano. 2018.
66. FAO. Juntos podemos prevenir la propagación de la Raza 4 tropical. 2018.
67. Vigilancia Epidemiológica Fitosanitaria. Fusariosis De Las Musáceas. Secretaria de Agricultura Y Desarrollo Rural. 2017;(02).
68. Torres-Trenas A, Prieto P, Cañizares MC, García-Pedrajas MD, Pérez-Artés E. Mycovirus *fusarium oxysporum* f. sp. *dianthi* virus 1 decreases the colonizing efficiency of its fungal host. Front Cell Infect Microbiol. 2019;9:51.
69. Sharzehei A, Afsharifar A, Banihashemi Z. Detección y caracterización de un micovirus arn bichanado en *Fusarium oxysporum* f. sp. *melonis*. 2007.
70. Torres-Trenas A, Cañizares MC, García-Pedrajas MD, Pérez-Artés E. Molecular and Biological Characterization of the First Hypovirus Identified in *Fusarium oxysporum*. Front Microbiol. 2020;10:3131.
71. Sato Y, Shamsi W, Jamal A, Bhatti MF, Kondo H, Suzuki N, et al. Hadaka virus 1: A capsidless eleven-segmented positive-sense single-stranded RNA virus from a phytopathogenic fungus, *Fusarium oxysporum*. MBio. 2020;11(3):e00450-20.
72. Torres-Trenas A, Pérez-Artés E. Characterization and incidence of the first member of the genus mitovirus identified in the phytopathogenic species *Fusarium oxysporum*. Viruses. 2020;12(3):279.

73. Nel B, Steinberg C, Labuschagne N, Viljoen A. Evaluation of fungicides and sterilants for potential application in the management of *Fusarium* wilt of banana. *Crop Prot.* 2007;26(4):697–705.
74. Nasir NNM, Ho CL, Lamasudin DU, Saidi NB. Nitric oxide improves tolerance to *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* Tropical Race 4 in banana. *Physiol Mol Plant Pathol.* 2020;111:101503.

ARTÍCULO DE REVISIÓN

Análisis de la cadena productiva de cacao en los contextos local y nacional de Colombia

Analysis of the production chain of cocoa in the local and national settings of Colombia

Jorge Alexis Tovar-León ¹; David Camilo Silva-Cobos ¹; Luz Nancy Mateus-Vargas ¹

¹Ingeniería Agronómica, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad de Cundinamarca. Facatativá, Cundinamarca, Colombia

RESUMEN. En este artículo se presenta un análisis de la cadena productiva del cacao, en el que se detallan las particularidades de su implementación en áreas agrícolas colombianas para realizar aportes de carácter conceptual y técnico para futuras investigaciones en este importante renglón agroindustrial. En el marco teórico se presentan referentes conceptuales, especialmente en aspectos de gestión económica y agraria, así como algunos elementos bióticos sobre las propiedades del cacao, y su relación con tratamientos químicos. A través de una perspectiva multidisciplinar se buscó desarrollar estrategias operativas para difundir y aplicar la legislación y optar por una economía verde, que apoye la cadena productiva a nivel local y nacional, implementando prácticas ambientalmente sostenibles para la ampliación de nuevos escenarios de aprovechamiento del cacao.

PALABRAS CLAVE: cacao, chocolate, cultivo de cacao, desarrollo rural, economía rural.

ABSTRACT. This paper presents an analysis of the cocoa production chain, detailing the particularities of its implementation in Colombian agricultural areas, and makes conceptual and technical contributions for future research in this important agro-industrial sector. The theoretical framework presents conceptual references, particularly in aspects of economic and agricultural management, as well as some biotic elements related to the properties of cocoa and its relationship with chemical treatments. Through a multidisciplinary perspective, we sought to develop operational strategies to disseminate and apply legislation that supports a green economy, which in turn promotes the productive chain at both local and national levels, while implementing environmentally sustainable practices to expand new scenarios for cocoa use.

KEYWORDS: chocolate, cocoa, cocoa cultivation, rural development, rural economy.

Para citar este artículo: Tovar-León, J. A., Silva-Cobos, D. C., & Mateus Vargas, L. N. (2023). Análisis de la cadena productiva de cacao en los contextos local y nacional de Colombia. *Ciencias Agropecuarias* 9(1), 39-60. <https://doi.org/10.36436/24223484.370>



Recibido: 05/07/2021 **Aceptado:** 26/12/2022 **Publicado en línea:** 10/02/2023

Contacto: Luz Nancy Mateus Vargas - lnmateus@ucundinamarca.edu.co

Introducción

El propósito del presente documento consiste en revisar la situación en la que se encuentra la producción del cacao en el departamento de Cundinamarca y a nivel nacional, para definir las debilidades o necesidades que tienen los productores de cacao, sobre todo los pequeños productores, y establecer una hoja de ruta que permita el crecimiento de estos productores de modo que puedan acceder al mercado nacional e internacional. La estrategia comercial y mercantil del cacao en el departamento de Cundinamarca (Colombia), ha estado enmarcada por escenarios socioeconómicos progresivos donde trabajan de forma articulada investigadores académicos, cultivadores, productores, comerciantes y entidades legislativas de carácter gubernamental y no gubernamental. A partir de estos encuentros de saberes, resulta necesario hacer una revisión documental sobre las condiciones en las que se produce el cacao, cómo se adelanta su cadena productiva, qué aspectos son considerados fundamentales, todo con el fin de brindar líneas estratégicas que conduzcan al diseño e implementación de prácticas eficaces de producción oportuna de cacao en este territorio.

El cacao es una planta de origen americano, considerada como uno de los productos más importantes a lo largo de la historia, por el uso milenario que los pueblos indígenas de Mesoamérica le han dado a este producto y que se remonta a hace miles de años, 1500 a.C., donde la evidencia arqueológica sugiere que el cacao fue cultivado y consumido por los antiguos olmecas, quienes vivían en lo que actualmente es el territorio de México (1). Las posteriores culturas de este territorio, mayas y aztecas, también lo utilizaron dentro de su dieta (2).

En diferentes estudios, también fue hallado el cacao en Suramérica, teniendo como centro de origen el alto amazonas, encontrándose en esta área un gran número de especies de cacao distinguiendo 11 grupos filogenéticos en la actualidad (3). Sin embargo, hay otros centros de diversificación genética importantes en América central, que han dado lugar a la domesticación de nuevas especies (4). La enorme cantidad de material vegetal que se domesticó en dicha época en Suramérica generó como resultado plantas con mayor resistencia a plagas y enfermedades (3). De esta manera, los materiales criollos

influenciaron aún más el desarrollo del cultivo, como fuente de mejoramiento de las plantas en las áreas donde hoy en día se produce cacao (5). Otro aspecto dentro de este desarrollo se debe al consumo de cacao como bebida, que de manera ancestral se generaba al disolver el polvo de las semillas en agua caliente, de donde la grasa de esta mezcla tendía a flotar, lo que permitía que fuera separada por los nativos cazadores para guardarlas y comerlas en sus largos recorridos (6). Los españoles colonizadores también experimentaron con este fruto, agregándole azúcar, el cual era desconocido por los nativos antes de la conquista, esta combinación dio paso a una bebida mejorada que se esparció por el Nuevo Mundo, y que eventualmente, llegó a España presentando un auge en la gastronomía de la época (6).

La planta de cacao es de naturaleza perenne, lo que permite tener varias temporadas de cosecha, fundamentalmente dos: la principal y la intermedia, que se diferencian por la cantidad del producto, y por los picos de producción anuales (7); la época de mayor o principal producción en Colombia se da en los meses de octubre hasta mediados de enero (7). Por ser el cacao un cultivo de origen tropical y subtropical se adapta a los factores climáticos críticos, y algunas variables importantes para su óptimo desarrollo fenológico son: temperaturas entre los 25 °C y 35 °C, lluvias anuales de 1400 mm, a estas circunstancias se suma el viento, que no supere los 40 km/hora y que haya una radiación solar entre los 400 y 1200 nanómetros (nm) (8). Por otro lado, el cacao requiere de suelos profundos y ricos en materia orgánica, en la mayoría de los casos, se prefieren sustratos franco-arcillo-limoso, con buen drenaje y topografía regular (9).

La presencia de cenizas es uno de los principales factores limitantes del suelo para el desarrollo del cacao porque captan el fósforo, así como una cubierta húmica muy delgada de menos de 10 cm o la presencia de sales en el sustrato (9). En Colombia, los cultivos de cacao se encuentran establecidos principalmente en suelos con un pH que oscila entre 4,0 y 7,0 y con texturas que varían desde arcillas erosionadas hasta arenas volcánicas recién formadas, razón por la que se considera que prospera en una gran variedad de tipos de suelo gracias a que es una planta de alta plasticidad (10).

Aunque el cacao es un cultivo del trópico, debe contar con un adecuado sombrero para que las plantaciones tengan fotoperiodos cortos en sus etapas iniciales y así, evitar

afectaciones en el desarrollo foliar y para proteger el cultivo de vientos que erosionen el suelo (11). Cuando el cultivo se encuentra establecido, con su desarrollo casi completo, se puede reducir el porcentaje de sombrío hasta en un 25 o un 30 % (12). La técnica de sombrío en el cultivo se implementa con especies intercaladas como musáceas y leguminosas, ingas o cedros, que generen sombra a diferentes porcentajes de luz (13). Otras especies como el laurel o frutales cítricos y el aguacate, entre otras, se han explorado en plantaciones de cacao, reconociendo en ellas otros servicios ecosistémicos (13).

La recolección adecuada del producto durante la cosecha requiere implementar una actividad previa, que consiste en alistar y desinfectar las herramientas y recipientes de recolección, así como desarrollar actividades de limpieza, adecuando los lugares de acopio para identificar las áreas de fermento y secado del grano, además se debe contar con personal capacitado en recolección y extendido (14). La cosecha se hace de manera directa de la planta y con guantes, para disminuir el riesgo por cortadas y minimizar la contaminación por contacto, no se toman los frutos caídos para evitar patógenos (14). Posteriormente, las mazorcas y granos extraídos se depositan en canastillas que soportan hasta tres arrobas para realizar los procesos de fermentación y la recolección se hace cuando los frutos presentan un 65 % de maduración (14, 15).

En la postcosecha, se seleccionan los frutos, retirando aquellos con presencia de enfermedades, daños mecánicos o defectos de apariencia que no sean adecuados para la comercialización (15). Luego, son llevados a cuartos de fermentación y depositados en canastillas, para luego aumentar la temperatura hasta 75°C, lo que estimula el aumento de procesos anaeróbicos de diferentes microorganismos y termina incrementando la concentración de azúcares y aceites del grano (15). Después de la selección, se realiza el empacado en costales de fique, de cuatro o cinco arrobas, para facilitar la movilidad en el centro de acopio o en las zonas a comercializar (15).

Estos aspectos de producción e industrialización han sido complementados con algunas iniciativas de fitomejoramiento a nivel nacional de la cadena productiva del cacao que han considerado la propagación de plántulas clonadas (plantas idénticas en constitución genética a otras y que se reproducen de manera asexual) que en general han

reportado mejores estándares de apariencia, tamaño, vigor, productividad, tamaño de los frutos, etc. en comparación con individuos silvestres (16). Además, en lo posible, se pretende que sean clones o nuevas variedades aprobadas con características deseables avaladas o determinadas por la Federación Nacional de Cacaoteros [Fedecacao] (16).

Tabla 1. Principales clones de plantas de cacao utilizados en Colombia.

Clones recomendados por zona agroecológica					
No.	Clones	Zona agroecológica*			
		BHT	VIS	ZMBC	MS
1	TSH-565	X	X	X	X
2	ICS-1	X	X	X	X
3	ICS-39		X	X	X
4	ICS-40			X	X
5	ICS-60	X	X	X	X
6	ICS-95	X	X	X	X
7	IMC-67	X	X	X	X
8	MON-1	X			
9	TSA-644		X	X	
10	EET-8				X
11	EET-96		X		
12	EET-400		X		
13	CCN-51	X	X	X	X
14	CAP-34				X
15	UF-613				X
16	FLE-3				X
17	SCC-61				X
18	FSA-11	X			
19	FSA-12	X			
20	FAR-5	X			
21	FTA-1	X			
22	FTA-2	X			

*Los principales clones de cacao utilizados en Colombia son: Montaña Santandereana [MS], Valle Interandino Seco [VIS], Bosque Húmedo Tropical [BHT], Zona Cafetera [ZCMB].

Fuente: (17)

Los genotipos de cacao que se cultivan en el país son reconocidos mundialmente, por lo que Colombia se puede convertir en un comercializador potencial de cacao en grano y de los productos terminados y de alta calidad que provienen de este (18). Por otra parte, el Plan Nacional de Desarrollo 2014-2018 “Todos por un nuevo país”, incluyó en su momento, la propuesta del cultivo del cacao como producto preponderante y priorizado dentro del programa “Colombia siembra” que estableció la legislación agropecuaria del gobierno nacional de esa época (19). Esta política pública se pretende mantener y fortalecer a largo plazo (20), a través de iniciativas como, por ejemplo, el Programa de Transformación Productiva [PTP] del Ministerio de Industria, Comercio y Turismo que incluyó el desarrollo del proceso agroindustrial del cacao encaminado a incrementar la productividad, calidad, investigación y el desarrollo de este producto en el sector agroindustrial (18).

Producción de cacao en Colombia

La producción de cacao tiene un rol importante en el contexto agronómico colombiano, dado que es un producto que genera ganancias de 4 500.000 pesos/hectárea (ha) y para realizar las labores culturales (agronómicas) necesarias para el cultivo de cada cosecha por ha de cacao, se requiere de cuatro empleados diarios (20). En la tabla 2 se muestra la dinámica y la importancia porcentual que tiene la producción de cacao por departamento en Colombia en el año 2020, donde los departamentos de Santander, Antioquia y Arauca son los mayores productores a nivel nacional, seguidos por Tolima, Huila, Nariño y Cundinamarca, en donde se observa un gran crecimiento en el número de ha sembradas (21). Dentro de los principales municipios productores se encuentran: el Carmen de Chucurí y Rionegro (Santander) y la zona del Catatumbo en Norte de Santander, los municipios de Apartadó y Turbo en el departamento de Antioquia y como el principal productor, Chaparral en el Tolima (22). Los datos de Fedecacao muestran que, de las aproximadamente 176.000 ha de cacao que se cultivan en Colombia, 25.000 ha aproximadamente, provenían de zonas con presencia de cultivos ilícitos (23).

Tabla 2. Porcentaje de participación en la producción de cacao en Colombia, para el año 2020, por departamentos y toneladas.

Departamento	Toneladas	Porcentaje de participación
Santander	26315	41%
Antioquia	5974	9%
Arauca	5082	8%
Tolima	4312	7%
Huila	4197	6%
Nariño	2980	5%
Cundinamarca	2127	3%
Meta	1949	3%
Norte de Santander	1606	3%
Cesar	1543	2%
Caldas	1343	2%
Boyacá	1280	2%
Putumayo	1133	2%
Córdoba	791	1%
Bolívar	505	1%
Cauca	485	1%
Caquetá	447	1%
Quindío	339	1%
Valle Del Cauca	339	1%
Magdalena	233	0,4%
Choco	133	0,2%
Guaviare	103	0,2%
Casanare	89	0,1%
Risaralda	79	0,1%
Vichada	14	0,02%
Atlántico	10	0,02%
Sucre	4	0,01%
La Guajira	3	0,01%
Amazonas	1	0,001%
Total	63416	100%

Fuente: (21).

Estos aspectos muestran un crecimiento en la agroindustria asociada al cacao, pues hace más de una década solo existían diez marcas de chocolate comestible de empresas tradicionales, según datos de Fedecacao, y actualmente existen al menos ciento cincuenta marcas de chocolate que, en la mayoría de los casos, provienen de iniciativas comunitarias y de la necesidad de crear productos con características especiales (de origen) (24). En los últimos años, la producción y las exportaciones de cacao colombiano han crecido sustancialmente, para el 2018 el país exportó aproximadamente 7000 toneladas de cacao en grano y por lo menos 13000 toneladas de productos semiacabados y terminados con base a este, y en los últimos cinco años la producción ha alcanzado entre 55000 y 60000 toneladas (25). Según datos del Ministerio de Comercio, Industria y Turismo el número de países exportadores de cacao ha aumentado de 17 en 2014 a 25 en 2021 y solo en Colombia, el valor de exportación del cacao y sus derivados es de \$78.700.000 dólares, comercializándose estos productos en más de cuarenta países actualmente (26).

De igual forma, con relación a la diversidad de usos del cacao procesado, a nivel nacional, como se muestra en la Tabla 3, se resalta el aprovechamiento de los componentes derivados del cacao y los beneficios que esto trae a los agricultores, ampliando la oferta en el mercado agrícola donde no solo se ofrece un cacao de altísima calidad, reconocido mundialmente, sino que también se puede incrementar el potencial en la exportación de los productos procesados (27).

Tabla 3. Usos de los principales derivados del cacao y su descripción.

Producto	Usos
Cáscara	Comida para animales y en ciertos casos, para preparar infusiones con hiervas, como sucede en Uruguay.
Cenizas de la cáscara de cacao	Elaboración de jabones y también como fertilizante para cacao, vegetales y otra clase de cultivos.
Jugo de cacao	Elaboración posterior de jaleas y mermeladas.
Manteca de cacao	Es el derivado más común, ya que se usa para la elaboración de chocolate y confiterías, así como dentro de la industria cosmética para la elaboración de cremas humectantes y jabones.
Pasta o licor de cacao	Exclusivamente para la elaboración de chocolate de mesa.
Polvo de cacao	Ingrediente para la elaboración de alimentos terminados, recetas bebidas achocolatadas, postres de chocolate y tortas.

Fuente: elaboración propia basada en (27).

León (28), indica que el cacao colombiano se ha posicionado internacionalmente cada vez más debido a su calidad, obteniendo la distinción de fino aroma, conferida por la “Organización Internacional de Cacao”, que exalta el exquisito sabor y aroma del producto, el cual representa solo entre el 6 % y 7 % de la producción global. En este orden de ideas, Colombia junto a Ecuador, Venezuela y Perú, es hoy uno de los principales productores del cacao de fino aroma del mundo, con casi el 76 % de la producción, es decir, son sus aromas y sabores particulares (frutales y florales) que lo hacen diferente de los demás (28). De acuerdo con Ruíz (29), el proceso industrial para la transformación del cacao se ha circunscrito a los países que lo importan, entre ellos los países europeos y Estados Unidos; es decir, los países que lo cultivan dejan de percibir las ganancias a partir de los diversos productos finales que se obtienen como mermeladas, cosméticos, licores, entre otros (29). Por lo que, integrar los diferentes factores de la cadena productiva que genera valor en la transformación del cacao puede aportar a la competitividad del cultivo y al posicionamiento de Colombia como un país productor clave a largo plazo.

Materiales y métodos

La revisión de textos consistió en ubicar artículos, documentos y trabajos de grado relacionados con el cultivo del cacao, sus características, cultivo, cadena de producción y exportación, las cuales se tomaron como palabras clave en el proceso de documentación. Se partió de los buscadores Google Académico, y bases de datos como Dialnet, Scielo y Redalyc, entre otras, para realizar la consulta y hallazgo de las investigaciones y de los referentes conceptuales en torno a la cadena productiva del cacao con énfasis en Cundinamarca en los últimos años, incluyendo las fuentes correspondientes a los últimos veinte años. Luego de revisar los documentos se seleccionaron y clasificaron dentro de las siguientes categorías: cadena productiva, cacao, cacao en Cundinamarca, políticas que regulan la cadena productiva del cacao. La indagación sobre el número de investigaciones realizadas se dividió en dos temáticas principales: cadenas de valor y producción de cacao en Cundinamarca. En cada artículo revisado se buscó resaltar las problemáticas que

poseen los sistemas productivos cacaoteros, además de describir los factores tecnológicos que pueden mejorar los procesos de gestión agrícola en las plantaciones.

La clasificación de los referentes teóricos se clasificó con los siguientes descriptores: título de la investigación, el autor (es), el año, objetivos trazados, la metodología y muestras operativas, las categorías más influyentes y sobresalientes, los resultados obtenidos bajo la modalidad de discusión y, los hallazgos conclusivos de las fuentes revisadas. Con esta base de datos, se analizó la información para generar el estado del arte sobre la cadena productiva del cacao.

Resultados

El total de artículos y documentos obtenidos durante la búsqueda fue de cincuenta, los encontrados en las bases de datos Dialnet tres, Scielo dos, Bibliotecas virtuales treinta, Fedecacao cuatro y de otras fuentes 11, de los cuales fueron analizados los documentos con la mayor información respecto al tema que se quería estudiar.

La situación actual de la investigación de la cadena productiva del cacao presenta los siguientes elementos, organizados de acuerdo con la evaluación de un paralelo estructural que considera aspectos teóricos, las causas y los efectos de las investigaciones recopiladas:

Diseño y análisis preliminar

Los elementos metodológicos abordados en las investigaciones vinculan de los tres métodos más comunes en la investigación: cualitativos (trabajo de campo, observación, investigación-acción), cuantitativos (encuestas, revisión documental, estadísticas) y mixtos. Es común hallar dentro de las fuentes teóricas, que los conceptos son tomados de referentes del siglo anterior, pero que siguen vigentes en la actualidad en Colombia, mientras que las investigaciones sobre la cadena productiva del cacao son más eficientes, porque antes del auge productivo del cacao en el país, eran pocos los planteamientos realizados sobre los requerimientos técnicos en la producción de esta especie.

También es frecuente encontrar que las categorías dominantes y abordadas corresponden a:

los actores del cultivo —(campesinos, cultivadores, simientes, productores, comerciantes, empresarios, entes gubernamentales, ONG, exportadores e, importadores—); al producto —(cacao, chocolate)—; y a los procesos de siembra, cosecha y producción —(suelo, proceso, tiempo, vigencia, caducidad, limitaciones, tierras, leyes)—.

Cadena productiva

Castellanos et. al., (30) proponen que las cadenas productivas de cacao están compuestas por cada uno de los actores involucrados en el proceso desde la siembra, cosecha, comercialización, procesamiento, distribución y consumo de un producto, tal como se muestra en la figura 1.

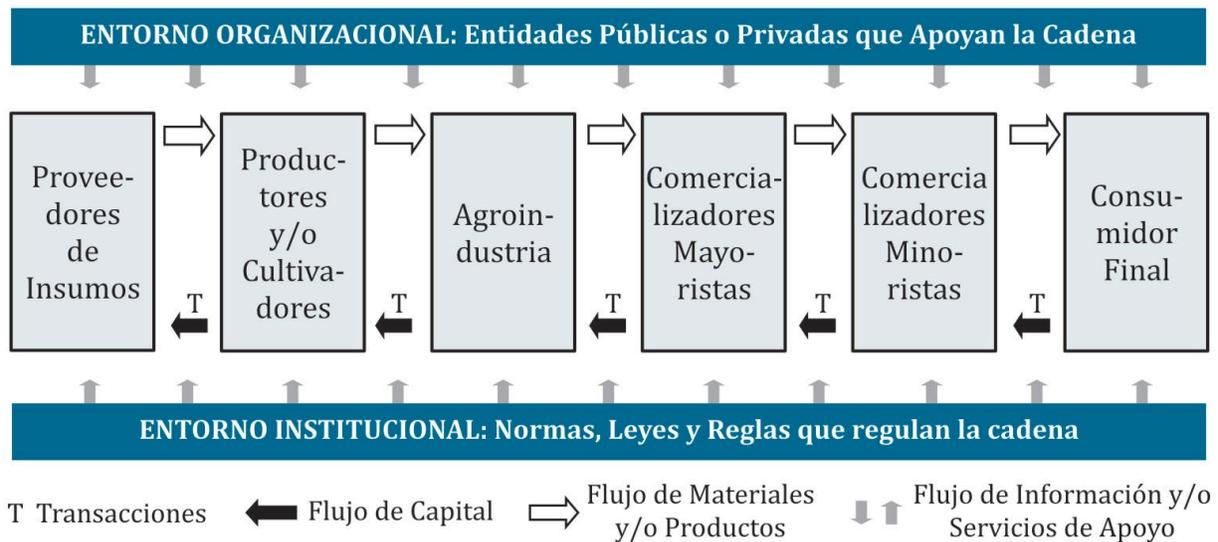


Figura 1. Modelo básico de una cadena productiva del cacao y los sectores que participan.

Fuente: (31).

En la cadena productiva del cacao se incluye la producción del grano, el procesamiento, su comercialización y la producción de chocolates o confites como se muestra en la figura 2.



Figura 2. Identificación de los actores de la cadena productiva de cacao

Fuente: Proyecto ColombiaMide, Informe ejecutivo (32).

Es así como la cadena productiva de cacao y sus derivados, ha establecido características sobre la obtención y comercialización que afectan la elaboración de productos de calidad. Algunas de ellas son los inadecuados procesos de fertilización en cultivo, que proporcionan un alto contenido de cadmio en el grano y de contaminantes, como pesticidas y micotoxinas, al medio ambiente (32). Es así, como en algunas regiones del Oriente colombiano se evidenció ineficiencia en los procesos de fermentación y secado y problemas en la comercialización, debido a la falta de criterios estandarizados que determinen la calidad del grano seco tipo exportación (32).

Adicionalmente, en el Censo metodológico del cacao del DANE (33), se estableció que las plantaciones cuentan con bajo nivel de tecnología en el país (aproximadamente el 78,27 % de estas), donde el agricultor realiza solo labores básicas de recolección de frutos, control de arvenses, y de poda de cultivos en diferentes etapas fenológicas (33). Mientras que solo un 22,87 % de los agricultores a nivel nacional se encuentran en un nivel tecnológico medio y menos del 1% cuenta con un nivel alto de incursión en desarrollo o implementación de alta tecnología, esto muestra que los sistemas productivos de cacao, en

las diferentes regiones del país, no cuentan con un rendimiento sostenible en la producción por unidad de área (33).

Por otra parte, el sistema productivo del cacao en Colombia alcanza los cuarenta años, lo que llevó a la generación de el “acuerdo de competitividad para la agro-cadena”, en el 2017, el cual incluye recomendaciones técnicas para la modernización de 130000 ha, con un nuevo material genético que fuera más resistente a las plagas, con lo cual Colombia desarrolló un material híbrido —por cruzamiento entre clones trinitarios y amazónicos y sus híbridos—, que dio como resultado que los granos tuvieran capacidad de ser sometidos al secado artificial (34). Por ello, la cosecha debe llevarse a cabo cada dos o tres semanas, con incidencia dentro de los picos establecidos anualmente en los meses de noviembre a enero y de abril a junio, ajustándose a la norma técnica colombiana (NTC) 1252, la cual expone los requisitos técnicos que debe cumplir el grano de cacao, para ser comercializado (34). No obstante, solo un pequeño porcentaje de los productores implementa esta norma en los trabajos de fertilización, riego, drenaje, siembra, entre otras variables (34), lo que deja un espacio importante para implementar procesos de asesoría técnica y extensionismo agrícola que ayuden a potenciar la cadena productiva del cacao.

En casos específicos algunos autores han considerado crear un sistema de gestión orientado a generar procesos de planeación, distribución y optimización de la comercialización en lugares con buena proyección productiva en cacao, como el caso de Yacopí, en Cundinamarca (35), con lo que eventualmente se ofrecerían mayores oportunidades laborales y desarrollo agrícola en el municipio, considerando los precios del cacao en mercados internacionales y el interés de los actores sociales y empresariales en esta región de invertir ingentes recursos en alternativas agrícolas que promuevan el bienestar social (35). Sin embargo, estas iniciativas requieren de apoyo gubernamental, subsidios a la producción y una mejor asistencia técnica rural a los productores, con el objetivo de garantizar los requerimientos de producción y calidad exigidos por los actores importadores y exportadores de cacao. Este acompañamiento técnico puede redireccionarse hacia capacitaciones a los pequeños agricultores que suelen competir en condiciones menos favorables que los grandes productores, pero que tienen un

conocimiento ancestral agroecológico que puede ayudar a impactar granos de calidad de origen y con mejores perspectivas de comercialización, dado su valor agregado (36).

Competitividad comercial del cacao

Para que una cadena de producción cacaotera sea competitiva, debe articular de manera armónica sus elementos económicos, tecnológicos y de capital para enfrentar de manera exitosa los cambios que ocurren en el mercado. En este proceso es clave la interacción con entes gubernamentales que coordinen estos procesos, lo que permitiría una incursión más exitosa en los mercados nacionales o internacionales (34). Bajo este constructo, García, et al. 2012 (34), en esa época señalaban que, en primer lugar, la competitividad en los mercados requiere analizar la capacidad de negociación de los compradores de acuerdo con su poder adquisitivo y exigencias de calidad mínima, y muy especialmente conocer los retos que imponen las cadenas logísticas en el desarrollo de infraestructura exportadora, ingreso de insumos agrícolas al país, y una mejor relación entre productores y transformadores de la materia orgánica (34).

En segundo lugar, también se debe determinar el análisis de las causas, efectos y repercusiones de la presencia del cacao, su valor y efectividad en las regiones donde se cultiva. Al respecto, Barrera (37) considera que la generación de valor agregado en la cadena productiva del cacao puede seguir algunas acciones socioeconómicas como las que ya implementa la Gobernación de Cundinamarca, fomentando una mayor equidad en el sector, desde el apoyo en acceso a créditos y acceso a maquinaria agrícola que promuevan el desarrollo de más y mejores incentivos a los productores, lo que a largo plazo puede fortalecer las asociaciones de productores que ya existen en esta región (37).

De este modo, algunas estrategias a seguir pueden ser el implementar en la cadena de producción algunos modelos de simulación de aplicabilidad y de la operación lógico-matemática (modelos estadísticos o minería de datos que simulan diferentes escenarios productivos y económicos) para dar cabida a propuestas de políticas públicas, que, desde la inversión en ciencia, tecnología e innovación, con modelos participativos de la sociedad,

les permita a los productores desarrollar mejores habilidades productivas y de comercialización directa, en lo posible (36).

Estos aspectos, también requieren de la evaluación del proceso, es decir, el diseño e implementación de herramientas de difusión y socialización que evalúen en el corto, mediano y largo plazo la efectividad de las inversiones realizadas, lo que promueve la gobernabilidad en el proceso productivo, desde la creación de protocolos de competitividad específicos, y acordes al contexto de cada territorio (30). Esta estructura en el manejo de la competitividad, desde una mejor organización en las cadenas de producción y logística del sector, permitirían alcanzar tasas de retorno de 35 %, con proyecciones de recuperación anualizadas, y proyectadas a obtener puntos de equilibrio en cinco años (38).

Cultivo de cacao en Cundinamarca

La realidad comercial del cacao en Cundinamarca transita hacia una producción agroforestal en el corto y mediano plazo, representando para el territorio el establecimiento de cultivos cada vez más amables con el medio ambiente, lo que potencializa la producción y la cadena de valor que se establece en los mercados del producto (39). Este aspecto se ha abordado en algunos trabajos que reportan disminución de los niveles de cadmio total en suelos cultivados con cacao, sin embargo, las cantidades siguen siendo elevadas y por ello se consideran como suelos contaminados que pueden alterar la calidad del fruto (40).

Por otra parte, el uso de herramientas y dispositivos tecnológicos, —experiencias de transferencia de información y tecnología en los municipios de Yacopí y Nilo (donde el cacao es un ingreso confiable y seguro para los productores)—, tiene tendencias hacia un aplicación media-baja, ya que la implementación de estos es costosa y tiene algunas dificultades, a causa de la escasez de mano de obra o falta de capacitación adecuada (41).

Otros estudios de caso relevantes, son los enfocados al manejo de la postcosecha, puntualmente, los procesos de fermentación y secado del cacao en Cundinamarca, en los que se ha evidenciado la necesidad de fomentar y brindar apoyo técnico a los agricultores, en donde el aporte de datos sobre el manejo agronómico y algunas variables morfológicas

de calidad en postcosecha e información verídica en tiempo real, han motivado a los agricultores a implementar a largo plazo acciones de mejora en sus cultivos (42).

Políticas de producción de cacao en Colombia

La política pública agraria como transformadora de la agroindustria da cuenta sobre la necesidad de fortalecer la institucionalidad mediante una mayor descentralización, para que se potencie la organización de cadenas productivas nacionales que integren las agendas regionales de los actores involucrados en la producción resiliente de cultivos. Lo anterior, implica integrar a los comités de cadenas regionales con los gobiernos nacionales, departamentales o locales, los cuales, junto al sector privado, puedan atender las necesidades y retos que requiere hoy el sector agroindustrial colombiano (43). Es por ello, que los ciclos productivos del cacao son un interesante eje de inversión, pues el foco geográfico de su producción en Colombia coincide con las áreas de mayores desarrollos económicos y de infraestructura vial, pero su desarrollo se limita por algunos factores como la desigualdad en la posesión de los suelos, o menores rendimientos por hectárea dados los factores abióticos tan dispares en la topografía colombiana (43). Estos aspectos son necesarios de considerar por los actores políticos del país, para que producto de mejores normativas productivas y ambientales, se mejore la competitividad de la cadena (43).

Es así como, Fedecacao resulta un factor importante para la implementación y mantenimiento de las diferentes normas de calidad y de seguridad, estableciendo los controles necesarios, que incluyan la prestación de servicios a la comunidad y a los actores de la producción cacaotera (44). Estos recursos y las reglamentaciones existentes se integran con otras entidades como el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural [MADR] y el Instituto Colombiano Agropecuario [ICA]. Un buen ejemplo de ello es el caso de la Campaña Monilia que está enfocada al control del hongo *Moniliophthora roreri*, causante de la principal enfermedad que afecta la producción de cacao (45). Es así como el MARD y la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA), instituciones adscritas al Sistema Nacional de Innovación Tecnológica, en conjunto con el Ministerio de Industria y Comercio han incentivado el desarrollo de los objetivos del Programa de

Transformación Productiva (45), encaminado a otorgar subsidios y otros mecanismos de financiación que activen el modelo de producción nacional asociado al cacao (45).

Estos esfuerzos de cooperativismo e interacción interinstitucional pueden potenciar la realización de investigaciones puntuales que lleven a mejorar algunas propiedades organolépticas del cacao colombiano, que son apetecidas por su textura, nutrientes, sabor y aroma. Son precisamente, estas características del cacao colombiano las que toman mayor relevancia, pues pueden potenciarse en el marco del postconflicto, como un cultivo que aporte valor agregado y oferta de empleo a las familias más vulnerables en las regiones del país donde pueda implementarse una cadena productiva rentable (46). Estos agroecosistemas, deben considerar, el acceso a infraestructuras clave para la comercialización del producto, los precios internacionales del cacao, así como su oferta y demanda con base al valor agregado que puede generar la aparición futura de variedades de origen.

El movimiento comercial en torno al cacao no necesariamente debe girar única y exclusivamente al mercado internacional; una actividad interesante a explorar es el agro ecoturismo, el cual puede incentivar el consumo de experiencias vivenciales asociadas a la producción del cacao, de modo tal que se genere una oferta de conocimiento y consumo nacional ligada al turismo ecológico (47, 48), tal como ocurrió en su momento con el café. Una política de largo plazo, orientada al fomento del agro ecoturismo en regiones cacaoteras, puede eventualmente generar en los agricultores y consumidores de cacao una mejor percepción de este producto, lo que a la postre puede representar mayores divisas para la economía nacional.

Conclusiones

Esta revisión resalta que la implementación de cadenas productivas de cacao en Cundinamarca y otras regiones de Colombia, ha sido relativamente reciente, y requiere de una mayor inversión en infraestructura, capacitación de personal dedicado a la producción y transporte del cacao, así como el diseño de una política y/o estrategia productiva de corto, mediano y largo plazo, que genere valor agregado a este producto. Lo anterior, permitiría

capitalizar algunas ventajas agroecoturísticas que por su ubicación geográfica ofrecen regiones como Cundinamarca, lo que puede generar incentivos públicos y privados para la competitividad del sector cacaotero colombiano que eventualmente, esperamos, pueda acceder a futuro a nuevos mercados que lo posicionen como un producto agrícola de alta calidad.

Recomendaciones

El aprovechamiento futuro de la cadena productiva del cacao en Cundinamarca requiere superar algunas visiones económicas históricas de utilitarismo comercial, y ampliar el panorama exportador, con la inversión de capital público y privado que incentive la creación de cadenas productivas con valor agregado desde la generación de innovación y nuevo conocimiento técnico-científico. En este sentido, Cundinamarca es un departamento con condiciones ideales para establecer una mayor interacción entre actores que intervengan en estas cadenas, evaluando a su vez el impacto social en la ruralidad del departamento, como un modelo de producción que puede ser replicado en otras regiones de Colombia.

Declaración de divulgación

Los autores declaran que no existe ningún potencial conflicto de interés relacionado con el artículo. No se emplearon herramientas de generación de contenido por inteligencia artificial para la elaboración del artículo.

Financiamiento

Los autores no declaran fuente de financiamiento para la realización de este artículo.

Referencias

1. Rodríguez-Velázquez N., Chávez-Ramírez B., Gómez de la Cruz I., Vásquez-Murrieta M., Estrada de los Santos P. El cultivo del cacao, sus características y su asociación con microorganismos durante la fermentación. Alianzas y Tendencias BUAP [Internet]. 2022 [citado 2022 abril 22]. <https://tinyurl.com/yc5djays>

2. Powis T., Cyphers A., Gaikwad N., Grivetti L., Cheong K. Cacao use and the San Lorenzo Olmec. Proc Natl Acad Sci U S A [Internet]. 2011;108(21):8595–600. [citado 2021 mayo 12]. <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.1100620108>
3. Díaz-Valderrama J., Leiva-Espinoza S., Aime M. The history of cacao and its diseases in the Americas. Phytopathology [Internet]. 2020;110(10):1604–19. [citado 2021 mayo 12]. <http://dx.doi.org/10.1094/phyto-05-20-0178-rvw>
4. Motamayor J., Risterucci A., Lopez P., Ortiz C., Moreno A., Lanaud C. Cacao domestication I: the origin of the cacao cultivated by the Mayas. Heredity (Edinb) [Internet]. 2002 [citado 2021 mayo 12]. 89(5):380–6. <https://www.nature.com/articles/6800156>
5. Batista, L. Guía técnica el cultivo de cacao. CEDAF. [Internet]. 2009 [citado 2021 mayo 12]. <https://intranet.cedaf.org.do/publicaciones/guias/download/cacao.pdf>
6. Hernández A. Chocolate: historia de un nahuatlismo. Estud Culto Náhuatl [Internet]. 2013 [citado 2021 mayo 12];46:37–87. Disponible en: https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0071-16752013000200003
7. Quintero M., Díaz K. El mercado mundial del cacao. Agroalim [Internet]. 2004, vol.9, n.18 [citado 2021 mayo 12], pp.47-59. Disponible en: <https://tinyurl.com/4ua9tr9b>
8. Antolinez E., Almanza P., Barona A., Polanco E., Serrano P. Estado actual de la cacaocultura: una revisión de sus principales limitantes. [Internet]. 2020 [citado 2021 mayo 12]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/journal/5600/560063241002/html/>
9. Maroto S., Montoya P., González D., Delgado T., Arvelo M. Manual técnico del cultivo de cacao prácticas latinoamericanas. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). [Internet]. 2017 [citado 2021 mayo 12]. Disponible en: <https://repositorio.iica.int/handle/11324/6181>
10. ANACAFE. Cultivo de cacao. [Internet] 2022. [citado 2022 abril 22]. Disponible en: <https://libreriaLatina.co/wp-content/uploads/2022/10/Cultivo-de-Cacao.pdf>
11. Sacristán E., Rojas F. Guía ambiental para el cultivo del cacao. FEDECACAO [Internet] 2013. [citado 2021 may. 12]. Disponible en: https://cadenacacaoca.info/CDOCDeployment/documentos/Guia_ambiental.pdf
12. El cultivo del cacao: Clima y suelo. [Internet] Engormix.com. Agricultura. 2013. [citado 2021 may. 12]. Disponible en: https://www.engormix.com/agricultura/cultivo-cacao/cacao-climasuelo_a26412/
13. Zambrano L. Establecimiento, manejo y capacitación en vivero de cacao (*Theobroma cacao* L). TESIS DE GRADO [Internet]. Cadenacacaoca.info. 2011. [citado 2021 may. 12]. Disponible en: <https://tinyurl.com/5xdee2t5>
14. Aguilar H. Guía de buenas prácticas de poscosecha de cacao. FHIA. [Internet] 2017. [citado 2021 may. 12]. Disponible en: <https://tinyurl.com/3wf8ct36>
15. Pérez, M. Guía de buenas prácticas de cosecha, fermentación y secado para la producción de cacaos especiales. Fundación Swisscontact. [Internet] 2017. [citado 2021 may. 12]. Disponible en: <https://tinyurl.com/kwhdbj4r>
16. Beltrán J., Córdoba R. Comportamiento eco fisiológico de cuatro clones de cacao (*Theobroma cacao*) propagados mediante tres métodos de injertación en el CURDN en Armero - Guayabal,

- Tolima. Tesis de grado [Internet]. 2012. [citado 2021 may. 12]. Disponible en: <https://tinyurl.com/y3dj2f9a>
17. Rojas J., Rojas F., Ramírez O. et. al. Guía técnica para el cultivo del cacao. [Internet]. 2012. [citado 2021 may. 12]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/20.500.12324/11685>
 18. Contreras C. Análisis de la cadena de valor del cacao en Colombia: generación de estrategias tecnológicas en operaciones de cosecha y poscosecha, organizativas, de capacidad instalada y de mercado. [Internet]. 2017 [citado 2021 may. 12]. Disponible en: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/60801>
 19. Departamento Nacional de Planeación. Plan Nacional de Desarrollo 2014-2018 todos por un nuevo país [Internet]. 2015. [citado 2021 may. 12]. Disponible en: <https://tinyurl.com/ykyu7akf>
 20. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. Cadenas Agrícolas y Forestales. Cadena de cacao [Internet]. Gobernador.co. [citado 2021 may. 12]. Disponible en: <https://tinyurl.com/4wwkuv6u>
 21. FEDECACAO. Así se comportó la producción de cacao por departamentos en el 2020 [Internet]. Sitiofedecacao. 2021 [citado 2021 may. 12]. Disponible en: <https://www.fedecacao.com.co/post/copy-of-design-a-stunning-blog>
 22. Carranza D. El cacao, un alimento que llevó paz a zonas de Colombia donde antes había guerra [Internet]. Com.tr. [citado 2021 may. 12]. Disponible en: <https://tinyurl.com/r4exp9su>
 23. Ministerio de comercio, industria y turismo. Cacao en Colombia, un producto reconocido a nivel mundial [Internet]. Procolombia. [citado 2021 may. 12]. Disponible en: <https://tinyurl.com/55852ysm>
 24. Abbott P., Benjamin T., Burniske, G., et. al. Análisis de la Cadena Productiva del Cacao en Colombia. [Internet]. 2019. [citado 2021 may. 12]. Disponible en: <https://tinyurl.com/4hwbjhm>
 25. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. Cadena de cacao: Indicadores e Instrumentos. [Internet]. 2018. [citado 2021 may. 12]. Disponible en: <https://tinyurl.com/yc44yve8>
 26. Ministerio de Comercio, Industria y Turismo. Exportaciones de cacao ascienden hoy a US\$78,7 millones y llegan a más de 40 países [Internet]. MINCIT. [citado 2021 may. 12]. Disponible en: <https://tinyurl.com/mrwdpydv>
 27. Vargas E. La producción y las exportaciones de cacao colombiano entre 2007 y el 2016: desafíos para lograr mayor competitividad en el mercado internacional. [Internet] 2018. [Monografía de especialización]. [citado 2021 may. 12]. Disponible en: <https://repositorio.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/6929/1/5131561-2018-II-NIIE.pdf>
 28. León L. Estudio de las condiciones de la cadena productiva de cacao en la población de Viotá - Cundinamarca. [Internet] Universidad Piloto de Colombia. 2018. [citado 2021 mayo 12]. Disponible en: <http://repositorio.unipiloto.edu.co/handle/20.500.12277/1303>
 29. Ruiz J. Cacao y su aporte al desarrollo colombiano. [Internet] 2014. [citado 2021 mayo 12]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10654/13292>
 30. Castellanos O., Torres L., Fonseca S., Montañez, M., & Sánchez A. Agenda prospectiva de investigación y desarrollo tecnológico para la cadena de cacao-chocolate en Colombia. [Internet] Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. 2007. [citado 2021 mayo 12]. Disponible en: <https://tinyurl.com/bdendwx7>
 31. Castellanos O., Torres L., & Domínguez K. Manual metodológico para la definición de agendas de investigación y desarrollo tecnológico en cadenas productivas agroindustriales. [Internet]

- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. 2009. [citado 2021 mayo 12]. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-56092009000200023
32. Colombia Mide. P. Informe ejecutivo: Estudio sobre las necesidades y brechas de calidad en la cadena productiva de cacao y sus derivados y plan de acción. Santander y su zona de influencia [Internet]. 2021. [citado 2021 mayo 12]. Disponible en: <https://tinyurl.com/4bj8zxt>
33. Departamento Administrativo Nacional de Estadística, DANE. Documento metodológico del cacao [Internet]. 2005. [citado 2021 mayo 12]. Disponible en: https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/agropecuaria/enda/ena/doc_met_cacao.pdf
34. García P., Montaña L., Montoya R. Análisis comparativo de competitividad de las cadenas productivas de cacao de Colombia y Ecuador. RCA [Internet]. 2012 [citado 12 mayo. 2021]; 29(1): 99-12. Disponible en: <https://revistas.udenar.edu.co/index.php/rfacia/article/view/372>
35. Rusinque J. Propuesta de un sistema de gestión para productos agrícolas cosechados en el municipio de Yacopí Cundinamarca, que les permita a las Familias Productoras Aumentar la Utilidad. [Internet]. 2016. [citado 2021 mayo 12]. Disponible en: <https://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/4107>
36. Pineda E., Téllez-Acuña, F. Modelado y simulación de la cadena productiva del cacao en Colombia. REDICUC. [Internet]. 2018. [citado 2021 mayo 12]. Disponible en: <https://repositorio.cuc.edu.co/handle/11323/2436>
37. Barrera M. Equidad en la cadena del cacao en el departamento de Cundinamarca. Universidad de los Andes. [Internet]. 2020. [citado 2021 may. 12]. Disponible en: <https://repositorio.uniandes.edu.co/handle/1992/48470>
38. Bermúdez H. Estudio de prefactibilidad para la creación de una microempresa productora de Cacao y sus derivados en la ciudad de Bogotá. Univ. Católica de Colombia. [Trabajo de grado]. [Internet]. 2021 [citado 2021 may. 12]. Disponible en: <https://repositorio.ucatolica.edu.co/handle/10983/25480>
39. Rojas M., Benavides M., Mayorga D., Manjarres D. Línea base y componentes agroecológicos de un sistema productivo de cacao en el municipio de Medina, Cundinamarca. I [Internet]. 2014 [citado 2021 mayo 12] 9(17):16-2. Disponible en: <https://revistas.uniminuto.edu/index.php/Inventum/article/view/1012>
40. Rodríguez H. Dinámica del cadmio en suelos con niveles altos del elemento, en zonas productoras de cacao de Nilo y Yacopí, Cundinamarca. [Internet]. Montevideo, Uruguay: Universidad de la República; 2018. [citado: 2021, mayo 12] Universidad Nacional de Colombia Sede Bogotá Facultad de Agronomía. Disponible en: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/62944>
41. Barrientos F., J. C., Gómez G., W. A. Análisis de la adopción de tecnología de producción de Cacao en Nilo y Yacopí (Cundinamarca – Colombia). International Simposio on Cocoa Research (ISCR). [Internet]. 2017 [citado 2021 mayo 12]. Disponible en: <https://tinyurl.com/yjbsfkk6>
42. Betancur F., Morales H., Bolívar C. Modelo de planta para la fermentación y secado de la almendra de cacao en el municipio de Paima - Cundinamarca. Universidad Piloto de Colombia. [Internet]. 2021 [citado 2021 may. 12]. Disponible en: <http://repository.unipiloto.edu.co/handle/20.500.12277/4302>

43. Parra-Peña R., Miller V, Lundy M. Cadenas productivas colombianas: Cómo la política pública transforma la Agricultura. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). [Internet]. 2013. [citado 2021 may. 12] 8, 1-6. Disponible en: <https://core.ac.uk/download/pdf/132667857.pdf>
44. Fedecacao. Quienes somos [Internet]. Sitiofedecacao. [citado 2021 may. 12]. Disponible en: <https://www.fedecacao.com.co/identidad-organizacional>
45. Barreto C. La red de política en el subsector cacaotero en Colombia. Pontificia Universidad Javeriana [Internet]. 2012 [citado 2021 may. 12]. Disponible en: <https://tinyurl.com/3zwnsamt>
46. Min Agricultura - Red de comunicaciones. Estrategia Nacional para la Cadena de Cacao presenta sus avances y resultados en la transformación de la industria. Ministerio de Agricultura de Colombia. [Internet]. 2019. [citado 2021 may. 12] Disponible en: <https://tinyurl.com/2x2tman>
47. Cely L. Oferta productiva del cacao colombiano en el posconflicto. Estrategias para el aprovechamiento de oportunidades comerciales en el marco del acuerdo comercial Colombia-Unión Europea. *Equidad & Desarrollo*, 2017;28,167-195. doi: <http://dx.doi.org/10.19052/ed.4211>
48. Medina Cárdenas Y. P., Ordoñez Villamil J. C. Proyecto de pre-inversión para la creación de una empresa productora de confites a base de almendra de cacao en el municipio de Cumaral –meta. [Internet]. 2018 [citado 2021 mayo 12]. Disponible en: <https://tinyurl.com/yrwsr7wh>

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN

Técnicas de riego no convencionales para el uso eficiente del agua y la mitigación de la variabilidad climática en el cultivo de arroz

Use of non-conventional irrigation techniques for efficient water use to mitigate the effects of climate variability on rice cultivation

Ronald Ricardo Martínez-Vega ^{1,2}; Sofiane Ouazaa ²; Nesrine Chaali ²; Camilo Ignacio Jaramillo-Barrios ²; John Edinson Calderón Carvajal ²; José Isidro Beltrán Medina ²; Óscar Barrero Mendoza ³; Tom De Swaef ⁴

¹Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C., Colombia; ²Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - Agrosavia, Centro de Investigación Nataima, Espinal, Tolima, Colombia; ³Universidad de Ibagué, Tolima, Colombia; ⁴ILVO Vlaanderen, Melle, Bélgica.

RESUMEN. El arroz es el cultivo de mayor importancia en el departamento del Tolima; sin embargo, presenta un alto consumo de agua por cuenta de las prácticas agrícolas ineficientes. Por esta razón, el empleo de técnicas de riego no convencionales surge como una estrategia para fomentar el uso eficiente del agua, especialmente, en los lugares que cuentan con condiciones de variabilidad climática y que afectan la disponibilidad hídrica. Para este fin, se compararon tres técnicas de riego —convencional; de múltiples entradas (MIRI, por sus siglas en inglés); y alternado húmedo y seco (AWD, por sus siglas en inglés)— en términos de productividad hídrica y de rendimiento del cultivo, en el periodo de dos ciclos de cultivo. Se observó que el uso de las técnicas de riego por MIRI y AWD permite reducir el consumo de agua en los cultivos de arroz hasta en un 54 % sin afectar el rendimiento, generando una mayor productividad hídrica en comparación con el riego convencional. De acuerdo con los resultados de este trabajo, es posible reducir el uso de agua de riego en el cultivo de arroz sin afectar su rendimiento.

PALABRAS CLAVE: productividad hídrica, riego por múltiples entradas, riego alternado húmedo seco.

ABSTRACT. Rice is the most important crop in the Tolima region. However, this crop has high water consumption due to inefficient agricultural practices. Therefore, the use of non-conventional irrigation techniques emerges as a strategy for efficient water use, especially in conditions of climatic variability that affect water availability. Three irrigation techniques were compared—conventional, Multiple Inlet Rice Irrigation (MIRI), and Alternate Wetting and Drying (AWD)—in terms of water productivity and crop yield, during two crop cycles. It was observed that the use of MIRI and AWD irrigation techniques allows for reducing water consumption in rice cultivation by up to 54% without affecting yield, which leads to greater water productivity with these techniques compared to conventional irrigation. According to the results of this study, it is possible to reduce irrigation water use in rice cultivation without affecting yield.

KEYWORDS: alternate wetting and drying, multiple inlet irrigation, water productivity.

Para citar este artículo: Martínez-Vega, R. R., Ouazaa, S., Chaali, N., Jaramillo-Barrios, C. I., Calderón Carvajal, J. E., Beltrán Medina, J. I., Barrero Mendoza, O. & De Swaef, T. (2023). Riego eficiente en el cultivo de arroz: Evaluación de las técnicas MIRI y AWD en el Tolima. *Ciencias Agropecuarias* 9(1), 61-71. <https://doi.org/10.36436/24223484.563>



Recibido: 9/10/2022 Aceptado: 23/11/2022 Publicado en línea: 10/02/2023

Contacto: Ronald Ricardo Martínez-Vega - rrmartinezv@unal.edu.co

Introducción

El cultivo de arroz abarca cerca de 200 000 000 de hectáreas (ha) en 114 países del mundo, siendo India el país con una mayor área sembrada, seguido de China y Bangladesh; no obstante, China presenta la mayor producción a nivel mundial con más de 210 000 000 toneladas anuales (1). En Colombia, el área sembrada en el 2021 fue de 544 635 ha, con una producción superior a las 3 300 000 toneladas anuales (2).

Se estima que el cultivo de arroz hace uso del 30 % del total de agua destinada a la agricultura (3), debido a que es cultivado mediante la práctica de inundación. Por lo tanto, hace uso de técnicas de riego ineficientes, en donde se aplica agua de forma homogénea en el terreno, sin tener en cuenta la variabilidad y heterogeneidad del suelo (4, 5).

Por cuenta de la variabilidad climática, principalmente de los fenómenos de El Niño y La Niña, se ha proyectado que se presentará una reducción del 10 % en el rendimiento de los cultivos como el arroz en la zona andina de Colombia (6) y que para el 2050, Colombia verá reducida la disponibilidad del terreno apto para este tipo de cultivo, hasta en un 60 % (7). Lo anterior se relaciona con el hecho de que la mayoría de los sistemas agrícolas captan el agua para el riego directamente de afluentes y de cuerpos de agua superficiales, que son más susceptibles a la reducción de las precipitaciones y el incremento de las temperaturas por cuenta de la variabilidad climática, llevando a una reducción en su caudal y, por tanto, a una reducción de la oferta hídrica (8).

Por esta razón, existen diversas tecnologías para la programación y distribución del riego de forma eficiente (4); sin embargo, los elevados costos hacen que sean poco accesibles para pequeños productores. Por ello es necesario implementar técnicas que permitan una mejor distribución y programación del riego y que sean accesibles para pequeños y medianos productores.

El proyecto RiceClimaRemote, desarrollado de manera conjunta por tres centros de investigación: la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Agrosavia), la Universidad de Ibagué (Unibagué) y el Flanders Research Institute for Agriculture, Fisheries and Food (ILVO, Bélgica), cuentan con una amplia experiencia en el desarrollo e implementación de nuevas tecnologías para el agro. Razón por la que el proyecto

RiceClimaRemote tiene por objetivo el desarrollo e implementación de prácticas de riego para el cultivo del arroz en el departamento del Tolima, con el fin de obtener una producción estable en condiciones de variabilidad climática. Dentro de los trabajos realizados en el marco del proyecto se comparó el uso de agua que tiene cada una de las tres técnicas de riego, así como el rendimiento del cultivo de arroz.

Técnicas de riego

En la técnica de riego convencional de distribución por gravedad, la distribución del agua se realiza, generalmente, por una única entrada en la parte superior del lote y requiere de un operario regador especializado para ir adecuando el lote, de tal manera que permita la distribución del agua a medida que avanza hasta la parte baja del cultivo. En el punto de entrada de agua al lote, se generan grandes pérdidas del líquido a causa de la percolación, alcanzando valores de hasta un 87 % del total de agua aplicada (9), teniendo en cuenta que el suelo ya está saturado y sigue entrando agua, como se muestra en la Figura 1. El 75 % del arroz cultivado a nivel mundial se irriga mediante esta técnica, principalmente en los países de Asia donde se concentra la mayor producción de arroz (10).

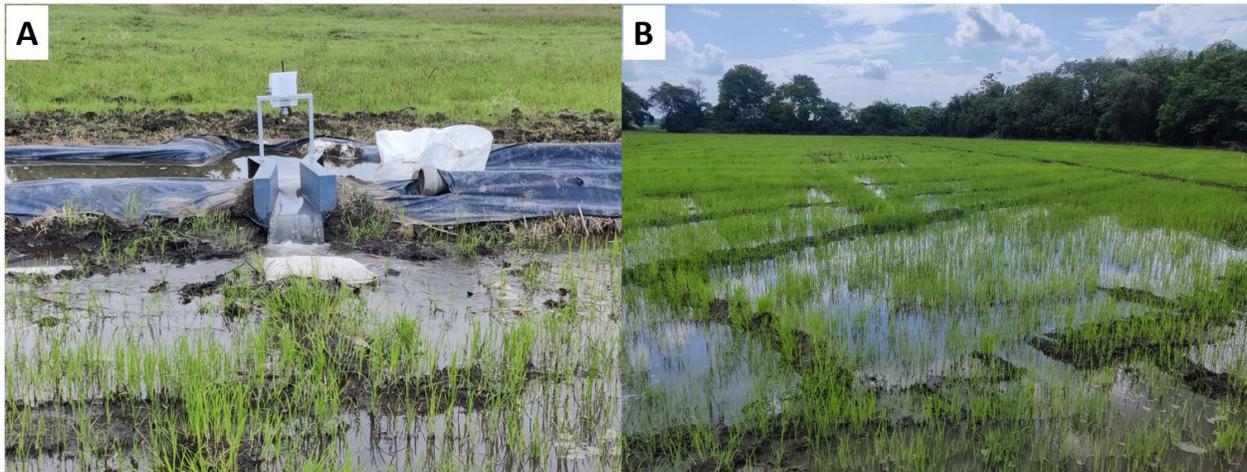


Figura 1. (A.) Punto de ingreso de agua y (B.) Melgas superiores en lote de arroz irrigado por técnica convencional

Fuente: elaboración propia

Ahora bien, la técnica de riego por múltiples entradas (MIRI) hace uso de una manguera de polietileno que atraviesa el lote de forma perpendicular a los caballones. La manguera presenta unas ventanillas que se pueden abrir o cerrar a conveniencia del terreno, de manera que se puede irrigar todo el lote de forma simultánea o solo a aquellas partes en las que se requiera, como se muestra en la Figura 2 (11).



Figura 2. (A.) Manguera de polietileno para distribución de agua y (B.) Ventanilla de control para salida de agua en lote de arroz irrigado por técnica MIRI.

Fuente: elaboración propia

Con esta tecnología se reduce el tiempo de irrigación, permitiendo la aplicación de manera directa en la parte baja del lote, sin la necesidad de esperar que las melgas superiores se inunden. Al tener un sistema de transporte de agua de baja presión no se requiere bombeo y la manguera puede ser reutilizada para varios ciclos de cultivo, reduciendo los costos en comparación con otros sistemas de riego (12). Este método sirve para reducir hasta en un 24 % el volumen de agua aplicada (13). En Colombia, el uso de la técnica MIRI ha generado una reducción del 30 % en el consumo del agua, sumado a la reducción obtenida con la implementación de las prácticas del programa Adopción Masiva de Tecnología (AMTEC) de Fedearroz (14).

Por otra parte, el riego alternado húmedo-seco (AWD) se basa en que la aplicación del riego se realiza en el momento en el que la humedad del suelo alcanza cierto umbral, con lo cual se diferencia del sistema convencional, donde el cultivo de arroz se mantiene la mayor parte del tiempo bajo condiciones de anegamiento. Con el fin de hacer un monitoreo de la humedad del suelo sin el uso de sensores —que tienen elevados costos para el

productor—, normalmente se inserta en el suelo, a unos 20 a 30 cm de profundidad, un tubo perforado de PVC, de 7 a 15 cm de diámetro y de 40 cm de largo para monitorear la lámina de agua en el terreno, como se muestra en la Figura 3 (15, 16).

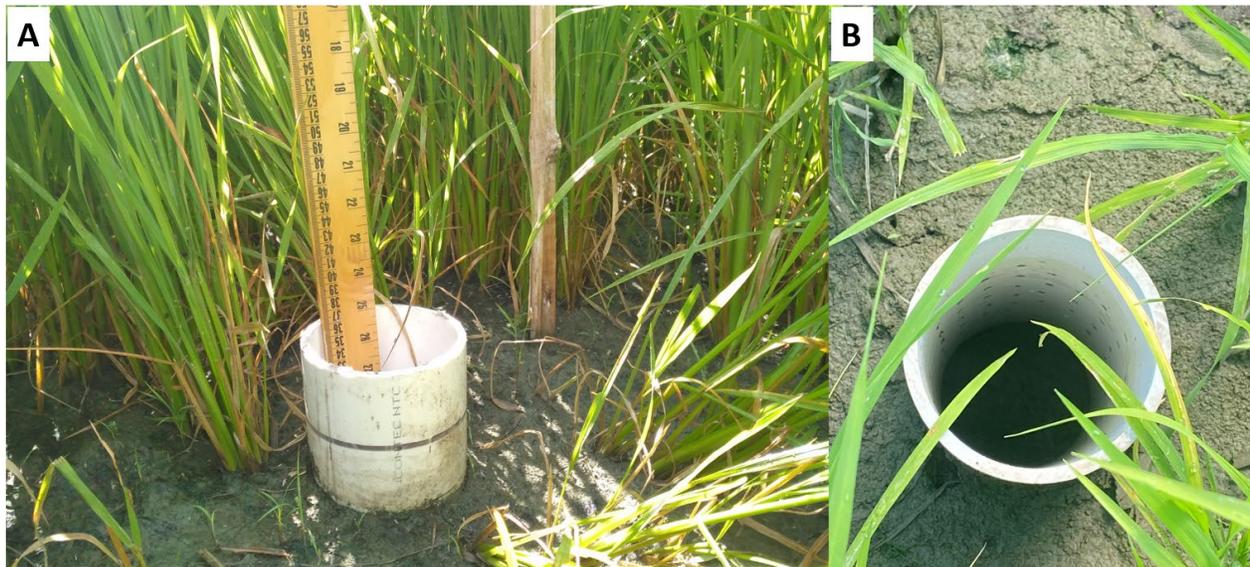


Figura 3. (Izq.) Vista lateral y (Der.) Vista superior de tubo indicador en lote de arroz irrigado por técnica AWD.

Fuente: elaboración propia

De acuerdo con el nivel de humedad al que se deja secar el suelo, representado por la altura de la lámina de agua en el tubo, se ha clasificado el AWD en tres categorías: como seguro o ligero (<15 cm por debajo del nivel del suelo); moderado (15 – 25 cm); y severo (>25cm) (17). La AWD ha sido adoptada en países productores como China, India y Filipinas, donde se reporta una reducción en el consumo del agua de hasta el 35 % (16). En Colombia, estudios preliminares de la implementación de este método, junto con un adecuado manejo del suelo, han mostrado reducciones de hasta un 42 % en el consumo del agua (18).

Dentro de las condiciones experimentales que se dieron en el centro de investigación Nataima de Agrosavia (Espinal, Tolima), no fue posible mantener el cultivo de arroz en condiciones de anegamiento continuo por más de cinco horas luego de suspender el riego, lo cual causó que no se viera la lámina de agua en los tubos indicadores después de este tiempo. La textura del suelo en el lote experimental fue franco-arenosa (A:67 %; Ar:14 %; L:19 %), se reportaron valores de infiltración de 20 a 30 mm/h (19). La imposibilidad de mantener

Ronald Ricardo Martínez-Vega, Sofiane Ouazaa, Nesrine Chaali, Camilo Ignacio Jaramillo-Barrios, John Edinson Calderón Carvajal, José Isidro Beltrán Medina, Óscar Barrero Mendoza y Tom De Swaef

el anegamiento en cultivos de arroz, sembrados en suelos con textura franco-arenosa, ha sido previamente reportada (20). Debido a esto y con el fin de realizar ciclos de alternado húmedo-seco, la humedad del suelo fue monitoreada usando sensores de humedad TDR 350 (21) y Diviner 2000 (22).

Consumo de agua en el cultivo de arroz bajo tres técnicas de riego

Las tres técnicas de riego fueron comparadas durante dos ciclos de cultivo de arroz (2021-2022), en donde se evaluó el consumo de agua al usar cada una. Para cuantificar el consumo se utilizaron canaletas tipo Parshall junto con un sensor ultrasónico, con el fin de determinar el caudal de entrada y cuantificar la lámina de agua aplicada (ver Figura 4). El uso de este método hace posible realizar un monitoreo sin estar presente en el sitio de producción, dado que el sensor esta provisto de tecnología inalámbrica para enviar la información a una estación, la cual, a su vez, está conectada a internet, por lo cual se puede tener acceso a los datos desde cualquier parte del mundo que tenga conexión a internet.



Figura 4. (A.) Canaleta tipo Parshall y (B.) Sensor ultrasónico para determinar caudal de riego
Fuente: elaboración propia

La cantidad de agua aplicada con la técnica de riego convencional fue mayor que la aplicada con las técnicas MIRI y AWD, en esta última, se observaron reducciones desde el 34 % hasta un 54 % (ver Tabla 1). Respecto a los eventos de riego, no se registraron cambios en los cultivos en relación con la técnica de riego usada. La cantidad de riego aplicada en el ciclo de 2022 fue menor, en comparación con el ciclo de 2021, lo cual está asociado con una

mayor precipitación y una mejor distribución de las lluvias a lo largo del ciclo de cultivo en el 2022. En el 2021 se registraron días de lluvia con valores de hasta 113 mm, los cuales se vinculan a los efectos de la variabilidad climática y la ocurrencia de eventos climáticos extremos.

Por otro lado, en la temporada seca es común que los productores no puedan regar el lote en su totalidad, a causa de la ventana de tiempo impuesta por el Distrito de Riego y deban priorizar la zona a regar. El uso de las técnicas MIRI y AWD permiten una mejor programación del riego y una aplicación más rápida y eficiente en sus lotes e incluso, tienen la posibilidad de ampliar el área sembrada con un consumo de agua menor al del riego convencional.

Tabla 1. Uso de agua con tres técnicas de riego durante dos ciclos de cultivo de arroz.

Técnica de riego	Ciclo de cultivo	Riego aplicado		Reducción de riego (%)	Eventos de riego	Precipitación (mm)	Precipitación efectiva (mm)
		m ³ /ha	mm				
MIRI	2021	4573	457,3	54,03	20	521,4	331,6
AWD		5179	517,9	47,93	24		
Convencional		9948	994,8	---	23		
MIRI	2022	2640	264	34,76	9	549	353,6
AWD		2319	213,9	42,69	10		
Convencional		4047	404,7	---	14		

Fuente: elaboración propia

Rendimiento del cultivo

Al comparar el rendimiento del cultivo no se observaron diferencias entre las tres técnicas de riego, lo que demuestra que la reducción en la cantidad de agua aplicada, como resultado de una aplicación más eficiente, no implica un menor rendimiento en el cultivo del arroz. En consecuencia, esto generó una menor productividad del agua con la técnica de riego convencional, donde hay menor producción de grano por metro cúbico de agua en el cultivo (ver Figura 5).

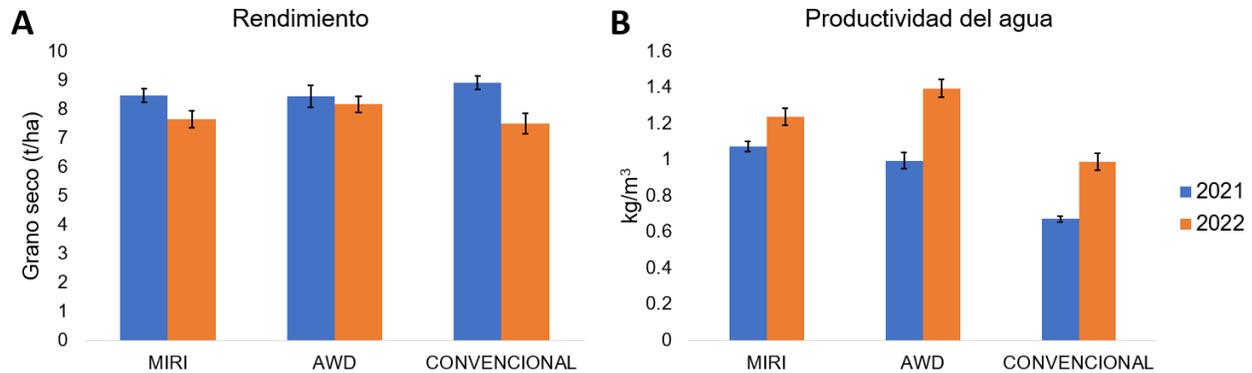


Figura 5. Rendimiento y productividad del agua en el cultivo de arroz usando tres técnicas de riego. La productividad del agua corresponde a kg de grano por m³ de agua que ingresa al cultivo (irrigación + precipitación efectiva). Fuente: elaboración propia

Conclusiones

Las técnicas de riego MIRI y AWD permitieron reducir el consumo del agua en comparación con la técnica convencional, sin que esta reducción en el uso del agua afectara el rendimiento del cultivo. La implementación de estas técnicas no requiere mayor infraestructura, como se demostró en los apartados anteriores; aunque su costo inicial es superior al del riego convencional, resultan más económicas a largo plazo. La inversión se justifica, teniendo en cuenta que la variabilidad climática y la ocurrencia de fenómenos climáticos extremos, que son cada vez más frecuentes, afectan el rendimiento de los cultivos e impactan negativamente la economía de los agricultores.

El uso de las técnicas MIRI y AWD generó una mayor productividad hídrica, fomentando una mejor gestión del riego para mitigar los efectos de la variabilidad climática. Así también, permiten dar mayor estabilidad al rendimiento de los cultivos a través del tiempo y alinearse con la necesidad mundial de producir más con menos agua.

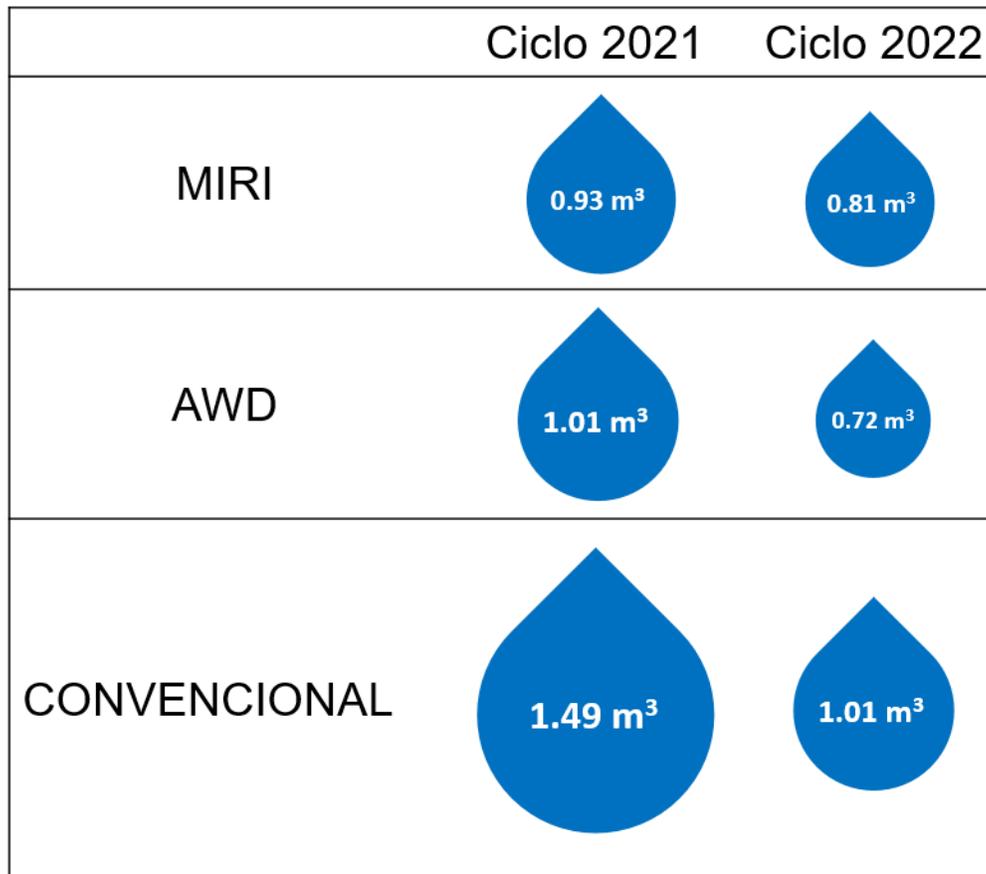


Figura 6. Requerimiento de agua para la producción de un kilo de grano de arroz.
Fuente: elaboración propia

Agradecimientos

Este trabajo está enmarcado dentro del proyecto “Manejo por sitio específico del agua de riego, el nitrógeno y las malezas en el sistema de producción de arroz, maíz-algodón en el departamento del Tolima”, código interno 1001643, Fase III (RiceClimaRemote), mediante convenio de 2018 entre la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Agrosavia), el Flanders Research Institute for Agriculture, Fisheries and Food (ILVO) y la Universidad de Ibagué (Unibagué). Los autores expresan su agradecimiento al gobierno de la región de Flandes, Bélgica y a las instituciones anteriormente mencionadas, por la financiación de este proyecto. Adicionalmente, un agradecimiento especial a la profesora Sarah Garré, Ph. D., por su colaboración en la interpretación de los datos de este trabajo.

Declaración de divulgación

Los autores declaran que no existe ningún potencial conflicto de interés relacionado con el artículo. No se emplearon herramientas de generación de contenido por inteligencia artificial para la elaboración del artículo.

Financiamiento

Esta investigación fue financiada por el International Climate Fund, Flemish Government, Belgica; Flanders Research Institute for Agriculture, Fisheries and Food, Melle, Belgica; Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria – Agrosavia; y Universidad de Ibagué – Unibague, a través del proyecto "Rice remote monitoring: climate change resilience and agronomical management practices for regional adaptation, RiceClimaRemote".

Referencias

1. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). FAOSTAT Statistical Database [Internet]. [citado en 2023]. Disponible en: <https://www.fao.org/faostat/en/#data>
2. Federación Nacional de Arroceros (Fedearroz). Estadísticas Arroceras [Internet]. [citado en 2023]. Disponible en: http://www.fedearroz.com.co/new/apr_public.php
3. Liu M, Lin S, Dannenmann M, Tao Y, Saiz G, Zuo Q, et al. Do water-saving ground cover rice production systems increase grain yields at regional scales? *Field Crops Res.* 2013;150:19-28.
4. González BM, Alonso AM. Tecnologías para ahorrar agua en el cultivo de arroz. *Nova.* 2016;14(26):111-26.
5. Datta A, Ullah H, Ferdous Z. Water Management in Rice. En: Chauhan B, Jabran K, Mahajan G, editores. *Rice Production Worldwide*. Springer, Cham; 2017.
6. Lobell DB, Cassman KG, Field CB. Crop yield gaps: their importance, magnitudes, and causes. *Annu Rev Environ Resour.* 2009;34:179-204.
7. Castro-Llanos F, Hyman G, Rubiano J, Ramirez-Villegas J, Achicanoy H. Climate change favors rice production at higher elevations in Colombia. *Mitig Adapt Strateg Glob Change.* 2019;24:1401-30.
8. García MC, Piñeros Botero A, Bernal Quiroga FA, Ardila Robles E. Variabilidad climática, cambio climático y el recurso hídrico en Colombia. *Rev Ing.* 2012;(36):60-4.

9. LaHue GT, Linqvist BA. The contribution of percolation to water balances in water-seeded rice systems. *Agric Water Manag.* 2021;243:106445.
10. Nawaz A, Rehman AU, Rehman A, Ahmad S, Siddique KHM, Farooq M. Increasing sustainability for rice production systems. *J Cereal Sci.* 2022;103:103400.
11. Vories ED, Tacker PL, Hogan R. Multiple inlet approach to reduce water requirements for rice production. *Appl Eng Agric.* 2005;21(4):611-6.
12. Pineda DF, Castilla LA, Sáenz JA, Saavedra WA. Diseño e implementación del sistema de riego en arroz por múltiples entradas en Colombia “MIRI” (Multiple Inlet Rice Irrigation). Adopción Masiva de Tecnología (AMTEC) [Internet]. Bogotá: Fedearroz; 2022 [citado en dic. 2022]. Disponible en: <https://tinyurl.com/56tr4d2m>
13. Massey JH, Reba ML, Adviento-Borbe MA, Chiu YL, Payne GK. Direct comparisons of four irrigation systems on a commercial rice farm: Irrigation water use efficiencies and water dynamics. *Agric Water Manag.* 2022;266:107606.
14. Guzmán MP, Sánchez AM, Hernández FJ. AMTEC alternativa para la competitividad y sostenibilidad. *Arroz.* 2020;68(549):27-31.
15. Carrijo DR, Lundy ME, Linqvist BA. Rice yields and water use under alternate wetting and drying irrigation: A meta-analysis. *Field Crops Res.* 2017;203:173-80.
16. Mote K, Rao VP, Ramulu V, Kumar KA, Devi MU. Performance of rice (*Oryza sativa* (L.)) under AWD irrigation practice—A brief review. *Paddy Water Environ.* 2021;20:1-21.
17. Lampayan RM, Samoy-Pascual KC, Sibayan EB, Ella VB, Jayag OP, Cabangon RJ, et al. Effects of alternate wetting and drying (AWD) threshold level and plant seedling age on crop performance, water input, and water productivity of transplanted rice in Central Luzon, Philippines. *Paddy Water Environ.* 2015;13:215-27.
18. Rojas A, Hernández F, Cuellar C, Quintero D, Garcés G, Saavedra E, et al. Resiliencia frente al cambio climático, otro logro del AMTEC. *Arroz.* 2021;69(552):12–27.
19. Brouwer C, Prins K, Heibloem M. Irrigation water management: Training manual no. 4: Irrigation scheduling. Roma: FAO; 1985.
20. Hatiye SD, Prasad KH, Ojha C. Water balance and water productivity of rice paddy in unpuddled sandy loam soil. *Sustain Water Resour Manag.* 2017;3:109-28.
21. Spectrum Technologies, Inc. Fieldscout TDR 350. Medidor de Humedad de Suelos. Manual del producto [Internet]. 2017. Disponible en: <https://tinyurl.com/4xba7dje>
22. Sentek Pty Ltd. Diviner 2000 [Internet]. Disponible en: <https://tinyurl.com/4wxw9fxu>



Universidad de
CUNDINAMARCA

www.ucundinamarca.edu.co

 Universidad
de cundinamarca

 ucundinamarcaoficial

 @ucundinamarca

 UCUNDINAMARCATV

