

VOL VII

Estudos em Ciências Agrárias e Ambientais

Eduardo Spers
(Organizador)



EDITORA
ARTEMIS

2026

VOL VII

Estudos em Ciências Agrárias e Ambientais

Eduardo Spers
(Organizador)



EDITORA
ARTEMIS

2026



O conteúdo deste livro está licenciado sob uma Licença de Atribuição Creative Commons Atribuição-Não-Comercial NãoDerivativos 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0). Direitos para esta edição cedidos à Editora Artemis pelos autores.

Permitido o download da obra e o compartilhamento, desde que sejam atribuídos créditos aos autores, e sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

A responsabilidade pelo conteúdo dos artigos e seus dados, em sua forma, correção e confiabilidade é exclusiva dos autores. A Editora Artemis, em seu compromisso de manter e aperfeiçoar a qualidade e confiabilidade dos trabalhos que publica, **conduz a avaliação cega pelos pares de todos manuscritos publicados, com base em critérios de neutralidade e imparcialidade acadêmica.**

Editora Chefe	Prof. ^a Dr. ^a Antonella Carvalho de Oliveira
Editora Executiva	M. ^a Viviane Carvalho Mocellin
Direção de Arte	M. ^a Bruna Bejarano
Diagramação	Elisangela Abreu
Organizador	Prof. Dr. Eduardo Eugênio Spers
Imagem da Capa	Bruna Bejarano, Arquivo Pessoal
Bibliotecário	Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422

Conselho Editorial

Prof.^a Dr.^a Ada Esther Portero Ricol, *Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría”*, Cuba
Prof. Dr. Adalberto de Paula Paranhos, Universidade Federal de Uberlândia, Brasil
Prof. Dr. Agustín Olmos Cruz, *Universidad Autónoma del Estado de México*, México
Prof.^a Dr.^a Amanda Ramalho de Freitas Brito, Universidade Federal da Paraíba, Brasil
Prof.^a Dr.^a Ana Clara Monteverde, *Universidad de Buenos Aires*, Argentina
Prof.^a Dr.^a Ana Júlia Viamonte, Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP), Portugal
Prof. Dr. Ángel Mujica Sánchez, *Universidad Nacional del Altiplano*, Peru
Prof.^a Dr.^a Angela Ester Mallmann Centenaro, Universidade do Estado de Mato Grosso, Brasil
Prof.^a Dr.^a Begoña Blandón González, *Universidad de Sevilla*, Espanha
Prof.^a Dr.^a Carmen Pimentel, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Brasil
Prof.^a Dr.^a Catarina Castro, Universidade Nova de Lisboa, Portugal
Prof.^a Dr.^a Cirila Cervera Delgado, *Universidad de Guanajuato*, México
Prof.^a Dr.^a Cláudia Neves, Universidade Aberta de Portugal
Prof.^a Dr.^a Cláudia Padovesi Fonseca, Universidade de Brasília-DF, Brasil
Prof. Dr. Cleberton Correia Santos, Universidade Federal da Grande Dourados, Brasil
Dr. Cristo Ernesto Yáñez León – New Jersey Institute of Technology, Newark, NJ, Estados Unidos



Prof. Dr. David García-Martul, *Universidad Rey Juan Carlos de Madrid*, Espanha
Prof.ª Dr.ª Deuzimar Costa Serra, *Universidade Estadual do Maranhão*, Brasil
Prof.ª Dr.ª Dina Maria Martins Ferreira, *Universidade Estadual do Ceará*, Brasil
Prof.ª Dr.ª Edith Luévano-Hipólito, *Universidad Autónoma de Nuevo León*, México
Prof.ª Dr.ª Eduarda Maria Rocha Teles de Castro Coelho, *Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro*, Portugal
Prof. Dr. Eduardo Eugênio Spers, *Universidade de São Paulo (USP)*, Brasil
Prof. Dr. Eloi Martins Senhoras, *Universidade Federal de Roraima*, Brasil
Prof.ª Dr.ª Elvira Laura Hernández Carballido, *Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo*, México
Prof.ª Dr.ª Emilas Darlene Carmen Lebus, *Universidad Nacional del Nordeste*, Argentina
Prof.ª Dr.ª Erla Mariela Morales Morgado, *Universidad de Salamanca*, Espanha
Prof. Dr. Ernesto Cristina, *Universidad de la República*, Uruguay
Prof. Dr. Ernesto Ramírez-Briones, *Universidad de Guadalajara*, México
Prof. Dr. Fernando Hitt, *Université du Québec à Montréal*, Canadá
Prof. Dr. Gabriel Díaz Cobos, *Universitat de Barcelona*, Espanha
Prof.ª Dr.ª Gabriela Gonçalves, *Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP)*, Portugal
Prof.ª Dr.ª Galina Gumovskaya – *Higher School of Economics*, Moscow, Russia
Prof. Dr. Geoffroy Roger Pointer Malpass, *Universidade Federal do Triângulo Mineiro*, Brasil
Prof.ª Dr.ª Gladys Esther Leoz, *Universidad Nacional de San Luis*, Argentina
Prof.ª Dr.ª Glória Beatriz Álvarez, *Universidad de Buenos Aires*, Argentina
Prof. Dr. Gonçalo Poeta Fernandes, *Instituto Politécnico da Guarda*, Portugal
Prof. Dr. Gustavo Adolfo Juarez, *Universidad Nacional de Catamarca*, Argentina
Prof. Dr. Guillermo Julián González-Pérez, *Universidad de Guadalajara*, México
Prof. Dr. Håkan Karlsson, *University of Gothenburg*, Suécia
Prof.ª Dr.ª Lara Lúcia Tescarollo Dias, *Universidade São Francisco*, Brasil
Prof.ª Dr.ª Isabel del Rosario Chiyon Carrasco, *Universidad de Piura*, Peru
Prof.ª Dr.ª Isabel Yohena, *Universidad de Buenos Aires*, Argentina
Prof. Dr. Ivan Amaro, *Universidade do Estado do Rio de Janeiro*, Brasil
Prof. Dr. Iván Ramon Sánchez Soto, *Universidad del Bío-Bío*, Chile
Prof.ª Dr.ª Ivânia Maria Carneiro Vieira, *Universidade Federal do Amazonas*, Brasil
Prof. Me. Javier Antonio Albornoz, *University of Miami and Miami Dade College*, Estados Unidos
Prof. Dr. Jesús Montero Martínez, *Universidad de Castilla - La Mancha*, Espanha
Prof. Dr. João Manuel Pereira Ramalho Serrano, *Universidade de Évora*, Portugal
Prof. Dr. Joaquim Júlio Almeida Júnior, *UNIFIMES - Centro Universitário de Mineiros*, Brasil
Prof. Dr. Jorge Ernesto Bartolucci, *Universidad Nacional Autónoma de México*, México
Prof. Dr. José Cortez Godinez, *Universidad Autónoma de Baja California*, México
Prof. Dr. Juan Carlos Cancino Diaz, *Instituto Politécnico Nacional*, México
Prof. Dr. Juan Carlos Mosquera Feijoo, *Universidad Politécnica de Madrid*, Espanha
Prof. Dr. Juan Diego Parra Valencia, *Instituto Tecnológico Metropolitano de Medellín*, Colômbia
Prof. Dr. Juan Manuel Sánchez-Yáñez, *Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo*, México
Prof. Dr. Juan Porras Pulido, *Universidad Nacional Autónoma de México*, México



Prof. Dr. Júlio César Ribeiro, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Brasil
Prof. Dr. Leiníg Antonio Perazolli, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Brasil
Prof.ª Dr.ª Livia do Carmo, Universidade Federal de Goiás, Brasil
Prof.ª Dr.ª Luciane Spanhol Bordignon, Universidade de Passo Fundo, Brasil
Prof. Dr. Luis Fernando González Beltrán, *Universidad Nacional Autónoma de México*, México
Prof. Dr. Luis Vicente Amador Muñoz, *Universidad Pablo de Olavide*, Espanha
Prof.ª Dr.ª Macarena Esteban Ibáñez, *Universidad Pablo de Olavide*, Espanha
Prof. Dr. Manuel Ramiro Rodriguez, *Universidad Santiago de Compostela*, Espanha
Prof. Dr. Manuel Simões, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal
Prof.ª Dr.ª Márcia de Souza Luz Freitas, Universidade Federal de Itajubá, Brasil
Prof. Dr. Marcos Vinicius Meiado, Universidade Federal de Sergipe, Brasil
Prof.ª Dr.ª Mar Garrido Román, *Universidad de Granada*, Espanha
Prof.ª Dr.ª Margarida Márcia Fernandes Lima, Universidade Federal de Ouro Preto, Brasil
Prof.ª Dr.ª María Alejandra Arecco, *Universidad de Buenos Aires*, Argentina
Prof.ª Dr.ª Maria Aparecida José de Oliveira, Universidade Federal da Bahia, Brasil
Prof.ª Dr.ª Maria Carmen Pastor, *Universitat Jaume I*, Espanha
Prof.ª Dr.ª Maria da Luz Vale Dias – Universidade de Coimbra, Portugal
Prof.ª Dr.ª Maria do Céu Caetano, Universidade Nova de Lisboa, Portugal
Prof.ª Dr.ª Maria do Socorro Saraiva Pinheiro, Universidade Federal do Maranhão, Brasil
Prof.ª Dr.ª M^ªGraça Pereira, Universidade do Minho, Portugal
Prof.ª Dr.ª Maria Gracinda Carvalho Teixeira, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Brasil
Prof.ª Dr.ª María Guadalupe Vega-López, *Universidad de Guadalajara*, México
Prof.ª Dr.ª Maria Lúcia Pato, Instituto Politécnico de Viseu, Portugal
Prof.ª Dr.ª Maritza González Moreno, *Universidad Tecnológica de La Habana*, Cuba
Prof.ª Dr.ª Mauriceia Silva de Paula Vieira, Universidade Federal de Lavras, Brasil
Prof. Dr. Melchor Gómez Pérez, Universidad del Pais Vasco, Espanha
Prof.ª Dr.ª Ninfa María Rosas-García, Centro de Biotecnología Genómica-Instituto Politécnico Nacional, México
Prof.ª Dr.ª Odara Horta Boscolo, Universidade Federal Fluminense, Brasil
Prof. Dr. Osbaldo Turpo-Gebera, *Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa*, Peru
Prof.ª Dr.ª Patrícia Vasconcelos Almeida, Universidade Federal de Lavras, Brasil
Prof.ª Dr.ª Paula Arcoverde Cavalcanti, Universidade do Estado da Bahia, Brasil
Prof. Dr. Rodrigo Marques de Almeida Guerra, Universidade Federal do Pará, Brasil
Prof. Dr. Saulo Cerqueira de Aguiar Soares, Universidade Federal do Piauí, Brasil
Prof. Dr. Sergio Bitencourt Araújo Barros, Universidade Federal do Piauí, Brasil
Prof. Dr. Sérgio Luiz do Amaral Moretti, Universidade Federal de Uberlândia, Brasil
Prof.ª Dr.ª Silvia Inés del Valle Navarro, *Universidad Nacional de Catamarca*, Argentina
Prof.ª Dr.ª Solange Kazumi Sakata, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN)- USP, Brasil
Prof.ª Dr.ª Stanislava Kashtanova, *Saint Petersburg State University*, Russia
Prof.ª Dr.ª Susana Álvarez Otero – Universidad de Oviedo, Espanha
Prof.ª Dr.ª Teresa Cardoso, Universidade Aberta de Portugal

Prof.ª Dr.ª Teresa Monteiro Seixas, Universidade do Porto, Portugal

Prof. Dr. Valter Machado da Fonseca, Universidade Federal de Viçosa, Brasil

Prof.ª Dr.ª Vanessa Bordin Viera, Universidade Federal de Campina Grande, Brasil

Prof.ª Dr.ª Vera Lúcia Vasilévski dos Santos Araújo, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Brasil

Prof. Dr. Wilson Noé Garcés Aguilar, *Corporación Universitaria Autónoma del Cauca*, Colômbia

Prof. Dr. Xosé Somoza Medina, *Universidad de León*, Espanha

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)**

E89 Estudos em ciências agrárias e ambientais VII [livro eletrônico] /
Organizador Eduardo Eugênio Spers. – 1. ed. – Curitiba, PR:
Editora Artemis, 2026.

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

Edição bilingue

Inclui bibliografia.

ISBN 978-65-82858-08-6

DOI 10.37572/EdArt_260626086

1. Ciências agrárias. 2. Ciências ambientais. 3.
Sustentabilidade. 4. Agricultura. I. Spers, Eduardo Eugênio.

CDD 630

Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422



PRÓLOGO

As Ciências Agrárias e Ambientais ocupam um papel estratégico na compreensão e no enfrentamento dos desafios contemporâneos relacionados à produção de alimentos, à conservação dos recursos naturais, à sustentabilidade dos sistemas produtivos e à promoção da saúde e do bem-estar das populações. Em um contexto marcado pelas mudanças climáticas, pela crescente demanda por alimentos, pela necessidade de uso racional dos recursos naturais e pela incorporação de novas tecnologias aos processos produtivos, torna-se cada vez mais importante fortalecer a produção e a difusão do conhecimento científico voltado para o desenvolvimento sustentável.

É nesse cenário que se insere o volume **VII de Estudos em Ciências Agrárias e Ambientais**, reunindo contribuições de pesquisadores de diferentes instituições e países que abordam, sob múltiplas perspectivas, temas relevantes para a agricultura, o meio ambiente, a biotecnologia e a produção animal. A diversidade dos estudos aqui apresentados evidencia a natureza interdisciplinar das Ciências Agrárias e Ambientais e sua capacidade de integrar conhecimentos biológicos, tecnológicos, sociais e produtivos em busca de soluções para desafios complexos.

A obra inicia-se com reflexões relacionadas aos recursos naturais, à sustentabilidade e à saúde ambiental. Os trabalhos deste primeiro eixo destacam a importância da agroecologia como alternativa para reduzir os impactos dos pesticidas sobre a saúde humana e o meio ambiente, ao mesmo tempo em que analisam percepções e atitudes ambientais de estudantes, ressaltando o papel da educação na construção de uma consciência ecológica capaz de contribuir para sociedades mais sustentáveis.

Em seguida, o volume direciona seu olhar para a produção vegetal, a inovação e a sustentabilidade dos sistemas agrícolas. Os capítulos desta seção abordam estratégias voltadas ao manejo sustentável de cultivos, incluindo o uso de biofertilizantes, a aplicação de insumos orgânicos e inorgânicos, aspectos fisiológicos e bioquímicos de espécies agrícolas e florestais, bem como os desafios e oportunidades associados à Agricultura 4.0. Em conjunto, esses estudos evidenciam a busca por sistemas produtivos mais eficientes, resilientes e alinhados às demandas contemporâneas de sustentabilidade.

O terceiro eixo reúne pesquisas relacionadas à genética, à biotecnologia e ao melhoramento de cultivos, com destaque para estudos envolvendo híbridos de milho azul. Os trabalhos apresentados demonstram a relevância da caracterização físico-química, molecular e genômica para o desenvolvimento de materiais genéticos de interesse agrônomo, contribuindo para avanços no melhoramento vegetal e para a ampliação do conhecimento sobre recursos genéticos de elevado potencial produtivo e nutricional.

Por fim, a obra contempla estudos voltados à produção animal, à nutrição e aos sistemas aquícolas. Os capítulos discutem alternativas sustentáveis para a alimentação e o manejo de animais de produção, bem como estratégias inovadoras aplicadas à aquicultura, envolvendo o uso de probióticos, diferentes fontes de carbono e sistemas biofloc. Essas pesquisas reforçam a importância de práticas produtivas capazes de promover eficiência, saúde animal e sustentabilidade econômica e ambiental.

Ao reunir investigações que transitam entre a sustentabilidade ambiental, a produção agrícola, a inovação tecnológica, a biotecnologia e a produção animal, este volume reafirma o compromisso da comunidade científica com a geração de conhecimento aplicado e socialmente relevante. Mais do que apresentar resultados de pesquisa, os trabalhos aqui reunidos contribuem para o fortalecimento do diálogo entre ciência, tecnologia e sociedade, oferecendo subsídios para a construção de sistemas produtivos mais sustentáveis, eficientes e comprometidos com o futuro.

Esperamos que esta obra possa servir de fonte de consulta, reflexão e inspiração para pesquisadores, estudantes, profissionais e demais interessados nas Ciências Agrárias e Ambientais, estimulando novas investigações e contribuindo para o avanço do conhecimento científico na área.

Eduardo Eugênio Spers

Esalq/USP

SUMÁRIO

RECURSOS NATURAIS, SUSTENTABILIDADE E SAÚDE AMBIENTAL

CAPÍTULO 1..... 1

LA AGROECOLOGÍA COMO SOLUCIÓN A LOS PROBLEMAS DE SALUD RELACIONADOS CON EL USO DE PESTICIDAS

María José de Dios Duarte

 https://doi.org/10.37572/EdArt_2606260861

CAPÍTULO 2.....25

ACTITUDES AMBIENTALES EN ESTUDIANTES DEL NIVEL MEDIO SUPERIOR AL NOROESTE DE TAMAULIPAS

Catalina Vargas Ramos

Graciela Hernández Moreno

Ma. De la Cruz Galindo Ceja

Alan León González Almaguer

Jorge Alejandro Gallegos de la Cruz

 https://doi.org/10.37572/EdArt_2606260862

PRODUÇÃO VEGETAL, INOVAÇÃO E SUSTENTABILIDADE DOS SISTEMAS AGRÍCOLAS

CAPÍTULO 3..... 34

BIOFERTILIZANTES COMO SUSTITUTO PARCIAL EN LA FERTILIZACION CONVENCIONAL DEL CULTIVO DE ARROZ EN EL CARIBE COLOMBIANO

Eliecer Miguel Cabrales Herrera

Laura Sofia Osorio Barcenas

 https://doi.org/10.37572/EdArt_2606260863

CAPÍTULO 4..... 50

APLICACIONES DE ENMIENDAS ORGÁNICAS E INORGÁNICAS EN GRANADO (*Punica granatum* L.) 'WONDERFUL': CONCENTRACIÓN DE NUTRIENTES EN HOJA

Rosa María Yáñez Muñoz

Juan Manuel Soto Parra

Esteban Sánchez Chávez

Ana Lilia Santana Díaz

Laura Raquel Orozco Meléndez

Ramona Pérez Leal
Nubia Guadalupe Torres Beltrán
Julio César Oviedo Mireles

 https://doi.org/10.37572/EdArt_2606260864

CAPÍTULO 5..... 69

MORPHOLOGICAL AND BIOCHEMICAL BEHAVIOR OF THE OLIVE TREE IN SEMI-ARID AREAS OF ALGERIA

Dhia Gharabi
Magheni Benchohra
Ahmed Bellhabib
Abdelkarim Hassani

 https://doi.org/10.37572/EdArt_2606260865

CAPÍTULO 6.....87

EFFECT OF GIBBERELIC ACID AND SILVER NITRATE ON THE GERMINATION OF *PINUS PSEUDOSTROBUS* LINDL.

Diana Gisselle Calderón Mejías
Lourdes Georgina Iglesias Andreu
Laura Yasmin Flores López

 https://doi.org/10.37572/EdArt_2606260866

CAPÍTULO 7.....97

DESARROLLO DE HABILIDADES DIGITALES EN LA AGRICULTURA 4.0: OPORTUNIDADES PARA AMÉRICA LATINA

Lourdes Mateos-Espejel

 https://doi.org/10.37572/EdArt_2606260867

GENÉTICA, BIOTECNOLOGIA E MELHORAMENTO DE CULTIVOS

CAPÍTULO 8..... 113

CARACTERES FISICOQUÍMICOS Y ANTOCIANINAS EN SEMILLAS DE LOS GENOTIPOS PARENTALES DEL HÍBRIDO DE MAÍZ AZUL DRÁCULA H 13

José Luis Arellano-Vázquez
Germán Fernando Gutiérrez-Hernández
Martín Filiberto García-Mendoza
Estela Flores-Gómez

 https://doi.org/10.37572/EdArt_2606260868

CAPÍTULO 9.....122

IDENTIFICACIÓN FÍSICA Y MOLECULAR DE LAS LÍNEAS Y CRUZAS QUE CONFORMAN AL HÍBRIDO DE MAÍZ AZUL VAMPIRO H10

Germán Fernando Gutiérrez-Hernández

José Luis Arellano-Vázquez

Estela Flores-Gómez

Aída Margarita Zamora-Contreras

Patricia Vázquez-Lozano

 https://doi.org/10.37572/EdArt_2606260869

CAPÍTULO 10.....129

GENÓMICA Y POTENCIAL FISIOLÓGICO DE LAS SEMILLAS DE LOS PARENTALES DEL HÍBRIDO DE MAÍZ AZUL VAMPIRO H10

Germán Fernando Gutiérrez-Hernández

José Luis Arellano-Vázquez

Estela Flores-Gómez

Aída Margarita Zamora-Contreras

Patricia Vázquez-Lozano

 https://doi.org/10.37572/EdArt_26062608610

PRODUÇÃO ANIMAL, NUTRIÇÃO E SISTEMAS AQUÍCOLAS

CAPÍTULO 11.....136

ACEITES ESENCIALES Y ÁCIDOS ORGÁNICOS: ALTERNATIVA A LOS ANTIBIÓTICOS COMO PROMOTORES DE CRECIMIENTO EN LOS CERDOS

Elmer Bonilla-Valverde

Juan Manuel Romo-Valdez

Jesús José Portillo-Loera

Ana Mireya Romo-Valdez

Laura Francisca Espinoza-Aguirre

Javier Alonso Romo-Rubio

 https://doi.org/10.37572/EdArt_26062608611

CAPÍTULO 12.....162

COMPARACIÓN DE LA DENSIDAD Y POTENCIAL REPRODUCTIVO DE *Daphnia pulicaria* EN DIFERENTES FUENTES DE CARBONO CON LA INCORPORACIÓN DE LA BACTERIA *Burkholderia cepacia* COMO PROBIÓTICO

Jorge Castro Mejía

Germán Castro Mejía

María del Carmen Monroy Dosta
José Antonio Mata Sotres
Andrés Elías Castro Castellón
Arnulfo Misael Martínez Meingüer
José Alberto Ramírez Torrez

 https://doi.org/10.37572/EdArt_26062608612

CAPÍTULO 13..... 175

DENSIDAD POBLACIONAL Y POTENCIAL PRODUCTIVO DE *Daphnia magna* UTILIZANDO CINCO ALIMENTOS INERTES (SALVADO DE TRIGO, LEVADURA, FRIJOL, ARROZ Y RÁBANO) Y DOS MICROALGAS (*Chlorella vulgaris* y *Navicula spp*), EN TINAS DE 120L (20°±2°C) Y 180 L (23°±2°C)

Jorge Castro Mejía
Germán Castro Mejía
José Antonio Mata Sotres
María del Carmen Monroy Dosta
Andrés Elías Castro Castellón
Arnulfo Misael Martínez Meingüer
José Alberto Ramírez Torrez

 https://doi.org/10.37572/EdArt_26062608613

CAPÍTULO 14..... 190

COMPARACIÓN DEL CRECIMIENTO DE *Oreochromis niloticus* EN UN BIOFLOC INCORPORANDO LA BACTERIA *Burkholderia cepacia* Y CUATRO FUENTES DE CARBONO

Germán Castro Mejía
Jorge Castro Mejía
Andrés Elías Castro Castellón
Arnulfo Misael Martínez Meingüer
María del Carmen Monroy Dosta
José Antonio Mata Sotres
José Alberto Ramírez Torrez

 https://doi.org/10.37572/EdArt_26062608614

SOBRE O ORGANIZADOR.....205

ÍNDICE REMISSIVO206

CAPÍTULO 1

LA AGROECOLOGÍA COMO SOLUCIÓN A LOS PROBLEMAS DE SALUD RELACIONADOS CON EL USO DE PESTICIDAS

Data de aceite: 25/06/2026

María José de Dios Duarte

Facultad de Enfermería
Universidad de Valladolid
Valladolid, 47006, España

<https://orcid.org/0000-0002-0148-1331>

RESUMEN: El uso masivo de plaguicidas en la agricultura ha generado preocupaciones sobre su impacto en la salud humana, especialmente en la microbiota intestinal. Diversos estudios han demostrado que estas sustancias químicas alteran la composición y diversidad de los microorganismos intestinales, lo que puede desencadenar enfermedades metabólicas, inmunológicas y neurológicas. Entre los efectos más preocupantes se encuentran el aumento de la permeabilidad intestinal, el desarrollo de enfermedades autoinmunes, obesidad, diabetes tipo 2, alergias y trastornos neurológicos como el Parkinson y la depresión. Frente a este problema, la agroecología surge como una alternativa sostenible que permite reducir la dependencia de plaguicidas mediante prácticas agrícolas basadas en la biodiversidad, el uso de biopesticidas naturales y la regeneración del suelo. La implementación de cultivos diversificados,

la rotación de cultivos y el uso de abonos orgánicos no solo protegen el microbioma intestinal de los consumidores, sino que también promueven ecosistemas agrícolas más resilientes y saludables. Adoptar modelos agroecológicos no solo beneficia la salud humana, sino que también contribuye a la seguridad alimentaria y la conservación del medioambiente. La transición hacia una agricultura libre de plaguicidas es esencial para mitigar los efectos negativos en el microbioma intestinal y prevenir enfermedades crónicas asociadas a su alteración.

PALABRAS CLAVE: salud; microbioma intestinal; plaguicidas; agroecología.

AGROECOLOGY AS A SOLUTION TO HEALTH PROBLEMS RELATED TO PESTICIDE USE

ABSTRACT: The massive use of pesticides in agriculture has raised concerns about their impact on human health, especially on the intestinal microbiota. Several studies have shown that these chemicals alter the composition and diversity of intestinal microorganisms, which can trigger metabolic, immunological and neurological diseases. Among the most worrying effects are increased intestinal permeability, the development of autoimmune diseases, obesity, type 2 diabetes, allergies and neurological disorders such as Parkinson's and depression. In the face of this problem, agroecology is emerging

as a sustainable alternative that makes it possible to reduce dependence on pesticides through agricultural practices based on biodiversity, the use of natural biopesticides and soil regeneration. The implementation of diversified crops, crop rotation and the use of organic fertilisers not only protect consumers' gut microbiomes, but also promote more resilient and healthier agricultural ecosystems. Adopting agroecological models not only benefits human health, but also contributes to food security and environmental conservation. The transition to pesticide-free agriculture is essential to mitigate the negative effects on the gut microbiome and prevent chronic diseases associated with its alteration.

KEYWORDS: health; gut microbiome; pesticides; agroecology.

1. INTRODUCCIÓN

La agroecología es un enfoque agrícola que combina la agricultura sostenible con los principios de la ecología, así su objetivo es desarrollar sistemas de producción de alimentos que sean responsables con el medio ambiente. Desde el enfoque de la agroecología se prioriza el uso de recursos locales, la protección de la biodiversidad y la regeneración de los suelos de manera que ello permite crear sistemas agrícolas resilientes y autosuficientes (James, Wolff & Wittman, 2023).

Desde los albores de la agroecología se busca la biodiversidad, el aprovechamiento de recursos naturales y llevar a cabo prácticas que permitan la regeneración del suelo y reduzcan la dependencia de sustancias externas. Así se pretende que no se utilicen productos químicos, puesto que ello conlleva un impacto importante en la contaminación de suelos y aguas y también contribuye a la eliminación de la biodiversidad. Esta forma de cultivar repercute en la creación de entornos agrícolas más resistentes a eventos climáticos extremos y que pueden mantener la productividad a lo largo del tiempo sin hacer daño al ecosistema.

La agroecología no es algo de ahora, no se trata de una moda, ni tampoco es algo utópico que se genere en la mente de unas pocas personas idealistas. Se trata de un modo de vivir en contacto y armonía con la naturaleza existiendo un profundo respeto por la tierra, ya los ancestros la practicaban. En algunas zonas esto se ha mantenido y se sigue practicando a través del cultivo de los huertos. Se recoge en una época del año, se consume y también se embasa o guarda para disponer de esos alimentos en otra.

El término salud ha ido evolucionando a lo largo de los años. La Organización Mundial de la Salud en 1948 estableció que salud es el estado de completo bienestar físico, mental y social y no solamente la ausencia de enfermedad (Organización Mundial de la Salud, 1978). Así, se entiende por salud física el correcto funcionamiento del cuerpo según la fisiología. La salud mental como el estado de bienestar emocional, psicológico y

social implicando la manera de pensar, sentir y actuar los dos primeros, y la salud social como el apoyo percibido por las relaciones sociales con las que un individuo cuenta.

La definición de salud de 1948 conlleva la consideración de la salud por primera vez de una manera integral. Posteriormente, se han ido añadiendo otras dimensiones a estas tres definidas inicialmente. Entre ellas es importante destacar la dimensión espiritual y la emocional de manera independiente y no contenidas en las tres iniciales. La salud emocional se refiere al mundo interior del individuo, y es aquella necesaria para hacer frente a las situaciones de estrés, en la definición integral inicial de salud se consideraba como una parte de la salud mental, puesto que, se relaciona con la realidad intrapsíquica del sujeto. En lo relativo a la salud espiritual engloba el bienestar emocional y mental y está fundamentada en la búsqueda del propósito, sentido y significado de nuestra vida. La espiritualidad es algo que todas las personas precisamos, que deriva de la necesidad de responder a ciertas preguntas, quiénes somos, de dónde venimos, hacia dónde vamos serían algunos de ejemplos. Esta dimensión de la salud facilita la plenitud, paz, consuelo y permite tener esperanza, de modo que ante las situaciones complejas la persona se siente más capaz de afrontarlas.

A día de hoy se conoce que la permeabilidad de la membrana intestinal y su microbiota juegan un papel relevante en la salud y en la enfermedad. La microbiota está compuesta por los microorganismos vivos que habitan el intestino, incluyendo distintas especies nativas que colonizan permanentemente el tracto gastrointestinal y una serie de microorganismos vivos que varían. La microbiota asegura la estructura y el funcionamiento intestinal (Rajilić-Stojanović & De Vos, 2014). En primer lugar, la capa mucosa, que refleja el equilibrio entre la secreción de moco y la degradación bacteriana, constituye un obstáculo para la captación de antígenos y moléculas proinflamatorias. Y, en segundo lugar, algunas comunidades bacterianas pueden reforzar la barrera a nivel de las uniones estrechas, evitando así la penetración en el organismo de macromoléculas (antígenos). Además, la microbiota intestinal está involucrada en el desarrollo de células y tejidos, inhibiendo el crecimiento de células transformadas mientras promueve la reversión de las células neoplásicas a células no neoplásicas (Álvarez et al., 2021).

La microbiota intestinal desempeña funciones esenciales para el mantenimiento de la salud, entre ellas funciones protectoras, estructurales y metabólicas. Así, contribuye directa o indirectamente a la estabilidad del organismo humano; actualmente su papel es incuestionable en la modulación del sistema inmune, la regulación del sistema nervioso, la síntesis de vitaminas, la defensa del intestino y el movimiento peristáltico (Prakash et al., 2011).

La alteración de la microbiota intestinal o disbiosis se ha relacionado con una mayor susceptibilidad a patologías intestinales, cardiovasculares, nerviosas, enfermedades como el cáncer, la fibromialgia o la esclerosis múltiple.

En el contexto del presente estudio y desde la perspectiva de la agroecología como un modelo de producción agrícola que contribuye a la promoción de la salud, se establece un contraste con la agricultura convencional, caracterizada por el uso de pesticidas y herbicidas. La exposición a estos compuestos químicos se ha vinculado con la inducción de mutaciones genéticas, así como con alteraciones en la composición de la microbiota intestinal, lo que puede tener repercusiones significativas en la salud humana y en el equilibrio ecosistémico (Ruiz Álvarez, Puig Peña & Rodríguez Acosta, 2010).

Los efectos disruptivos de varios pesticidas, organofosforados y neonicotinoides, sobre el epitelio intestinal y la composición de la microbiota intestinal han sido evidenciados en distintas investigaciones (Ma et al., 2021; Chen et al., 2025; Wei, Wang & Liu, 2023).

A partir de mi experiencia como profesional de la salud y del trabajo de investigación que desarrollo desde el año 2004 se plantea este trabajo.

El objetivo de este estudio es analizar las alteraciones en la salud humana derivadas de la exposición a plaguicidas, tanto en las personas directamente expuestas como en su descendencia en caso de gestación.

Se busca identificar los efectos fisiológicos, neurológicos y metabólicos asociados a dicha exposición, con el fin de comprender sus implicaciones a corto y largo plazo en la salud humana y en el desarrollo fetal.

Para abordar esta problemática se establecen los siguientes objetivos específicos:

- Analizar la evidencia científica sobre la relación entre la exposición a plaguicidas en cultivos agrícolas y las alteraciones de la salud de las personas
- Analizar la evidencia científica sobre la relación entre la exposición a plaguicidas en cultivos agrícolas y las alteraciones de la salud en modelos animales que presenten similitudes genéticas, biológicas y conductuales con los seres humanos
- Examinar las repercusiones en la salud humana y modelos animales derivadas de la disrupción de la microbiota intestinal, con especial énfasis en los cambios en la permeabilidad de la membrana intestinal y sus posibles implicaciones en enfermedades metabólicas, inmunológicas y neurológicas
- Diseñar propuestas de intervención orientadas a la reducción del impacto de los plaguicidas en la salud pública, mediante estrategias de regulación, alternativas sostenibles en la agricultura y medidas de prevención en poblaciones vulnerables.

- Para alcanzar los dos primeros objetivos específicos la pregunta de investigación de partida que planteo es la siguiente: ¿Qué alteraciones se producen en los seres humanos como consecuencia del uso de plaguicidas en el cultivo de alimentos?

Para concretar la evidencia científica disponible actual sobre esta pregunta de investigación se propone la utilización de trabajos de revisión sistemática. Este tipo de trabajos constituyen un resumen exhaustivo y objetivo de la investigación existente sobre un tema concreto. Además, proporcionan la mejor evidencia disponible en cuanto a la toma de decisiones en la práctica clínica y agrupan un gran número de estudios individuales en un único documento habiendo pasado y estado sujetas a una revisión crítica por parte de expertos en la materia.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

Se llevó a cabo una revisión sistemática de la evidencia científica publicada, siguiendo las recomendaciones de la declaración PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses).

2.2. ESTRATEGIA DE BÚSQUEDA

Se realizó una búsqueda de la evidencia científica existente desde el año 2018 hasta la actualidad en la base de datos Medline con el objetivo de recopilar la mayor información disponible con respecto al tema a tratar. Solo se incluyeron artículos publicados en inglés.

Debido al razonamiento expuesto y al estado del conocimiento disponible sobre la relación entre agroecología y salud esta revisión comenzó con un diseño de búsqueda en torno a estos dos conceptos: “agroecology” y “health”. Una vez realizadas las búsquedas relativas a cada uno de los términos se continuó haciendo uso del operador booleano “AND”. Se utilizó el algoritmo “agroecology” AND “health”. Posteriormente, se incluyó el operador booleano “OR” para excluir. Así, la sintaxis de búsqueda fue (“agroecology”) AND (“disease” OR “illness”). En base a la falta de resultados encontrados con este algoritmo se decidió ampliar la búsqueda especificando bacterias y pesticidas. La sintaxis en este caso fue (“agroecology” OR “pesticides” OR “herbicides”) AND (“disease” OR “illness”). Los resultados continuaron siendo escasos y no estaban relacionados con lo que queríamos indagar. Se dirigió la búsqueda utilizando “gut microbiota”. Así, la

sintaxis resultante de búsqueda fue (“agroecology” OR “pesticides” OR “herbicides”) AND (“disease” OR “illness” OR “gut microbiota”). El número encontrado de resultados fue muy numeroso y dispar. Se definió y dirigió nuevamente la búsqueda estableciendo la sintaxis final en (“pesticides” OR “herbicides” OR “plaguicidas”) AND (“gut microbiota”).

Los trabajos seleccionados fueron sólo revisiones sistemáticas, de tal modo que así garantizamos el máximo nivel de evidencia (Nivel I) correspondiente a evidencia científica obtenida de revisiones sistemáticas de todos los ensayos clínicos con asignación aleatoria relevantes.

Este trabajo se ha desarrollado desde finales de junio de 2024 a finales de agosto de 2024 y desde finales de enero de 2025 a mediados de marzo de 2025.

2.3. CRITERIOS DE ELEGIBILIDAD

Respecto a los criterios de inclusión fueron los siguientes:

- Artículos que fueran revisiones sistemáticas (Nivel I)
- Revisiones sistemáticas escritas en inglés
- Revisiones sistemáticas que tuvieran disponible el texto completo
- Revisiones sistemáticas relativas a alteraciones de la salud relacionadas con el uso de pesticidas
- Revisiones sistemáticas de estudios experimentales desarrollados con ratas y ratones

En lo relativo a los criterios de exclusión estos fueron:

- Revisiones sistemáticas que contuvieran evidencia relativa a contaminantes orgánicos persistentes
- Revisiones sistemáticas que contuvieran evidencia relativa a metales
- Revisiones sistemáticas que contuvieran sustancias disruptoras hormonales
- Revisiones sistemáticas que contuvieran sustancias plásticas
- Revisiones sistemáticas que contuvieran otras sustancias que no se encuentren entre el grupo de plaguicidas utilizados en la agricultura tradicional
- Revisiones sistemáticas que se hayan realizado en aves o animales que difieren mucho de las características del organismo humano

2.4. SELECCIÓN DE ARTÍCULOS

En primer lugar, se realizó una primera búsqueda haciendo uso de los algoritmos de búsqueda descritos en el apartado de estrategia de búsqueda, con el fin de conocer

la cantidad de publicaciones existentes y obtener así la mayor información posible para responder la pregunta de investigación establecida inicialmente.

Posteriormente, y de acuerdo con los criterios de inclusión y exclusión establecidos, se realizó una identificación de los artículos que resultaban interesantes para este trabajo. Para ello se llevó a cabo la lectura de los títulos y resúmenes de artículos.

A continuación, se llevó a cabo un cribaje. Se accedió al texto completo de los artículos preseleccionados y se realizó una lectura para determinar su idoneidad, descartándose aquellos que no estaban en la línea de la temática o que no presentaban conclusiones relativas a la pregunta de investigación establecida.

Finalmente, se seleccionaron los artículos para la realización de esta revisión de acuerdo a las recomendaciones de Galarza y Cruz (2024).

2.5. EXTRACCIÓN DE DATOS

Se extrajeron las siguientes variables de los artículos seleccionados: autores, año de publicación, pesticida, muestra y/o tipo de estudio, resultados o conclusiones dependiendo de si los resultados se repetían.

3. RESULTADOS

3.1. RESULTADOS DE LA SELECCIÓN DE ESTUDIOS

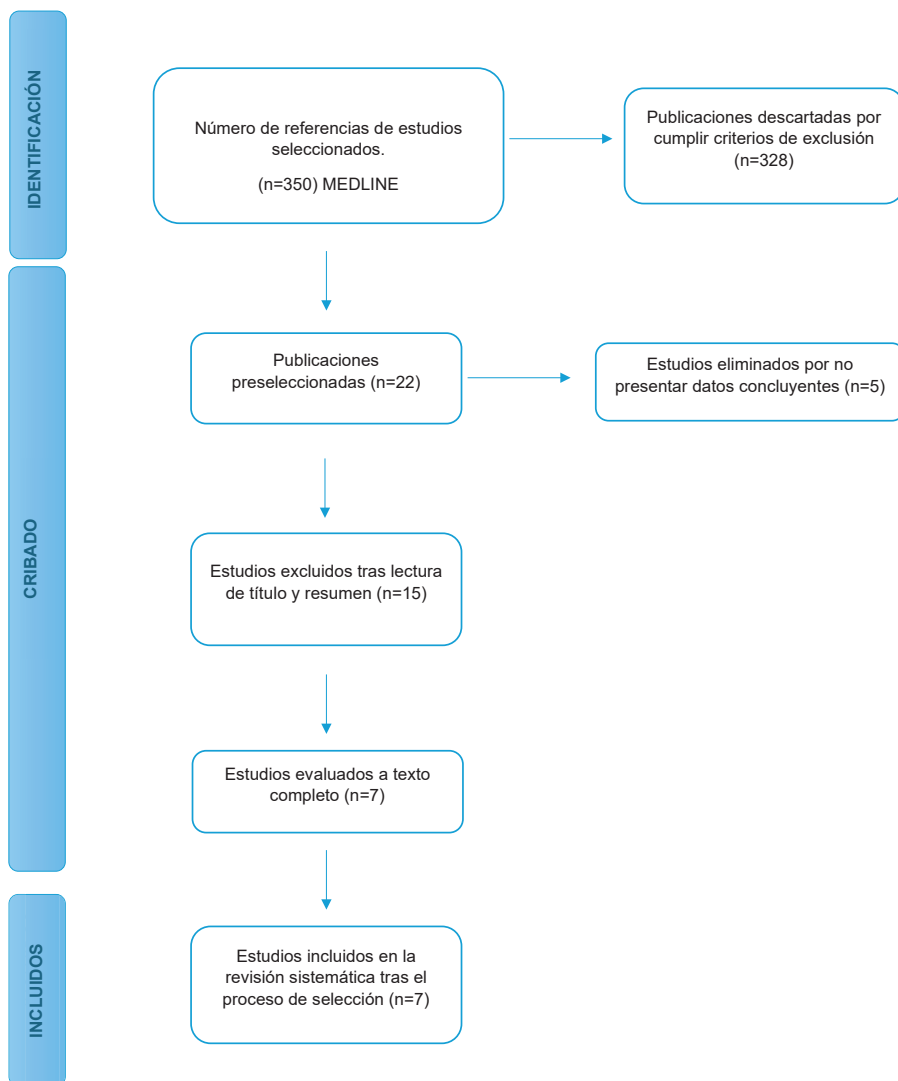
La búsqueda realizada por el algoritmo (“agroecology” OR “pesticides” OR “herbicides”) AND (“disease” OR “illness” OR “gut microbiota”) arrojó 10.850 resultados. Tras afinar la búsqueda haciendo uso de la sintaxis final establecida (“pesticides” OR “herbicides” OR “plaguicidas”) AND (“gut microbiota”) el número de trabajos encontrados fue de 350 artículos. Después y una vez considerados los criterios de elegibilidad establecidos los estudios seleccionados fueron 22.

A continuación, se llevó a cabo el cribado de los 22 artículos que restaban, descartándose 10 porque no se adaptaban exhaustivamente a la temática establecida para este trabajo y 5 por no presentar datos concluyentes.

Finalmente, se seleccionaron 7 artículos para la realización de esta revisión sistemática. El proceso de búsqueda se muestra en el diagrama de flujo (Figura 1).

Entre las 7 revisiones seleccionadas para la realización de este trabajo, 3 estudios proceden de Estados Unidos y 4 de Europa. Los datos más relevantes de las revisiones seleccionadas se presentan en la sección 3.2, “Síntesis narrativa de los estudios incluidos”.

Figura 1. Diagrama de flujo para la selección de estudios.



3.2. SÍNTESIS NARRATIVA DE LOS ESTUDIOS INCLUIDOS

Las revisiones incluidas en este trabajo permiten identificar una relación consistente entre la exposición a plaguicidas, las alteraciones del microbioma intestinal y la aparición de efectos metabólicos, inmunológicos y neurológicos. En conjunto, los estudios analizados incluyen evidencia procedente de investigaciones en humanos, especialmente en mujeres embarazadas y descendencia expuesta durante la gestación, así como estudios experimentales desarrollados en ratas y ratones:

3.2.1. Yue et al. (2024)

Analizaron distintos pesticidas, insecticidas, herbicidas y fungicidas, incluyendo β -HCH, mecarbam, glufosinato de amonio, una combinación de boscalid, captan, clorpirifos, tiacloprid, tiofanato y ziram, clorpirifos, nitenpyram, procimidona, fenvalerato, diclorodifeniltricloroetano, cipermetrina, triticonazol, flusilazol, clordecona, glifosato, paraquat, permetrina y endosulfán. Los estudios considerados incluyeron madres humanas, ratas progenitoras, crías de ratas, ratones padres y crías de ratones. En madres humanas expuestas a β -HCH y mecarbam se identificó pérdida de peso en la descendencia. En ratones padres expuestos a glufosinato de amonio se observaron anomalías del comportamiento, mientras que la exposición a la combinación de boscalid, captan, clorpirifos, tiacloprid, tiofanato y ziram se relacionó con obesidad y trastornos metabólicos. En crías de ratas expuestas a clorpirifos se identificaron hiperlipidemia e hipoglucemia en la descendencia femenina, alteraciones conductuales ante situaciones nuevas y cambios en la función de la glutamina y en la señalización del GABA en la amígdala. En crías de ratones, el clorpirifos se relacionó con interferencia en las neuronas del desarrollo. La exposición a nitenpyram en ratones padres se asoció con disminución de glucosa sérica en la descendencia femenina. En ratas progenitoras, la procimidona se vinculó con trastornos metabólicos y afectaciones neurológicas a lo largo de la vida; también se observaron trastornos metabólicos y alteraciones del neurodesarrollo en la descendencia, dependientes del sexo, en ratones padres. La exposición a fenvalerato en ratones padres aumentó el peso húmedo intrauterino, la altura de las células epiteliales luminales y los niveles de LH. El diclorodifeniltricloroetano se asoció con defectos en el neurodesarrollo de ratones macho, y la cipermetrina con alteraciones auditivas de aparición progresiva. En ratas progenitoras, el triticonazol y el flusilazol se asociaron con alteraciones endocrinas; en el caso del triticonazol, también se observaron cambios en la transcripción del genoma de genitales externos del feto masculino. La clordecona se vinculó con defectos y disminución del número de espermatozoides en ratones padres. El glifosato, en ratas progenitoras, se relacionó con enfermedad prostática, obesidad, enfermedad renal, alteraciones ováricas, anomalías en el parto y cambios vinculados con inflamación y genes de estrés oxidativo en el córtex y el cerebelo de la descendencia. El paraquat se asoció con aumento de peso en la edad adulta en descendientes de ratones. La permetrina produjo afectación negativa del microbiota intestinal en crías de ratones, mientras que el endosulfán se vinculó con trastornos metabólicos y obesidad en ratones padres. El clorpirifos en ratas progenitoras generó afectación negativa del microbiota intestinal, cambios profundos en el microbioma del ciego, translocación bacteriana en

hígado y bazo y una tasa de natalidad más baja. En crías de ratones se observó disbiosis temprana en la membrana intestinal y, en crías de ratas, modificaciones del microbioma, hiperlipidemia e hipoglucemia en descendencia femenina, alteraciones conductuales ante situaciones nuevas, reducción de la respuesta inmunitaria en hembras y asma. En conjunto, este estudio concluye que la exposición prenatal a pesticidas induce cambios en el microbioma intestinal, genera disbiosis e impacta la salud y el comportamiento, afectando cepas bacterianas clave y contribuyendo a fluctuaciones de peso, alteraciones en la homeostasis energética, síntomas neuroconductuales similares al autismo, bajo peso corporal, modificaciones en genes bacterianos asociados al metabolismo de carbohidratos y lípidos, anomalías conductuales, obesidad, trastornos metabólicos y alteraciones inmunológicas e inflamatorias.

3.2.2. Yang et al. (2023)

Analizaron la relación entre exposición a pesticidas, microbioma intestinal y trastorno del espectro autista. Entre los compuestos considerados se incluyeron glifosato, clorpirifos, piretroides, imidacloprid, diazinón y glufosinato de amonio. En estudios de casos y controles con embarazadas expuestas a glifosato, se observó un aumento del riesgo de trastorno del espectro autista en la descendencia de mujeres que vivían a menos de 2000 metros de zonas donde se utilizaban herbicidas. En ratas Sprague-Dawley, la exposición perinatal a glifosato produjo cambios en los comportamientos maternos y en la plasticidad neuronal, así como alteraciones en el comportamiento de la descendencia. En ratones ddY se observaron déficit cognitivo, déficit de interacción social y anomalías conductuales similares al trastorno del espectro autista en descendencia de ratones macho. En ratones suizos, el glifosato se asoció con déficit de interacción social, comportamiento estereotipado repetitivo, cambios morfológicos en células gliales residentes en el cerebro, reducción de la permeabilidad de la barrera hematoencefálica y alteración de la actividad de la acetilcolinesterasa. En mujeres embarazadas expuestas a clorpirifos, los estudios mostraron correlación positiva entre exposición materna y trastorno del espectro autista en la descendencia, asociación inversa entre exposición prenatal y desarrollo neuropsicológico específico en niños de 12 meses, aumento de rasgos autistas en niños de 11 años con exposición prenatal, mayor riesgo de trastorno del espectro autista cuando la exposición ocurrió durante el segundo o tercer trimestre del embarazo y aumento del riesgo conforme se incrementó la exposición. En ratas Sprague-Dawley, el clorpirifos produjo conductas típicas de fenotipos del trastorno del espectro autista, como deterioro de la comunicación social y conducta restringida

y repetitiva. En ratones BTBR, la exposición prenatal favoreció rasgos conductuales típicos del trastorno del espectro autista, incluyendo alteraciones en los dominios social y comunicativo, cambios en la vocalización ultrasónica y altos niveles de comportamientos repetitivos. En ratas Wistar se observaron hipermovilidad relacionada con el estrés, hipo o hipersensibilización de los sistemas colinérgico y GABAminérgico, aumento de la transcripción de la subunidad GABA-A-A2 y de los genes del receptor M2, inhibición de la acetilcolinesterasa, estimulación de la liberación de hormonas hipofisarias, inflamación sistémica y disminución de la capacidad de respuesta a la novedad social en la edad adulta, junto con déficits de comunicación similares a los del trastorno del espectro autista. En ratones C57BL/6, la exposición prenatal a clorpirifos se asoció con efectos negativos a largo plazo en el comportamiento social, disminución de la exploración de objetos desconocidos, afectaciones en el equilibrio excitatorio-inhibitorio y, en ratas *fmr1-KO*, exacerbación del fenotipo similar al trastorno del espectro autista. En relación con los piretroides, estudios en embarazadas indicaron que la exposición durante el tercer trimestre se asoció con mayores probabilidades de síntomas de trastorno del espectro autista; los niveles más altos de piretroides en orina también se vincularon con mayor riesgo en la descendencia. En ratas Wistar se observó pérdida de neuronas dopaminérgicas de la sustancia negra y, en ratones C57BL/6, inflamación neuronal. El imidacloprid se asoció en estudios de casos y controles con embarazadas con un aumento del 30% del riesgo de trastorno del espectro autista en la descendencia. El diazinón en ratones C57BL/6 produjo disminución de la regulación de neurotransmisores. El glufosinato de amonio en ratones ICR se relacionó con actividad locomotora dañada, comportamientos similares al trastorno del espectro autista y deterioro de la memoria a corto plazo. En conjunto, el estudio establece una relación entre alteración del microbioma intestinal, exposición a pesticidas, disbiosis, neurodesarrollo y manifestaciones conductuales asociadas al trastorno del espectro autista.

3.2.3. Gambarte y Wolansky (2022)

Analizaron la influencia de diversos insecticidas, herbicidas y fungicidas sobre el microbioma intestinal y las vías metabólicas. En ratones macho Kunming expuestos a clorpirifos se observó alteración de la composición del microbiota y de las vías metabólicas. En ratas macho Wistar expuestas al mismo compuesto se identificaron alteraciones en la composición del microbiota, aumento de patógenos oportunistas, asociación con obesidad, fenotipos de diabetes, alteraciones en células de los islotes pancreáticos, modificación de los mecanismos responsables del control de la respuesta inflamatoria

y alteraciones micro y macroestructurales en el intestino derecho. En ratones C57BL/6 expuestos a diazinón se observaron cambios en la composición del microbioma intestinal, en el metagenoma funcional y en las vías metabólicas, con diferencias según el sexo del animal. El monocrotopos se relacionó, en ratas CFT-Wistar, con cambios funcionales y morfológicos en el intestino y, en ratones BALB/c, con cambios en la expresión de genes vinculados a vías metabólicas, intolerancia a la glucosa y biotransformación de pesticidas. El aldicarb, en ratones C57BL/6, produjo alteraciones específicas del microbioma a lo largo de la exposición, dependientes del género bacteriano. La permetrina en ratas macho Wistar y crías lactantes se asoció con alteración de la composición del microbiota, reducción de géneros bacterianos beneficiosos y aumento de géneros bacterianos perjudiciales. El propamocarb produjo cambios en la composición del microbioma intestinal en ratones macho ICR siete días después del inicio de la exposición oral. El carbendazim alteró la composición del microbioma a los siete días en ratones macho ICR y C57BL/6, con aumento de bacterias nocivas y disminución de bacterias beneficiosas, así como variaciones de abundancia relativa según el género bacteriano. El epoxiconazol, en ratas hembra Sprague-Dawley, produjo alteraciones en la composición del microbioma, también dependientes del género bacteriano. El glifosato en ratas Sprague-Dawley generó disbiosis de la microbiota intestinal con efectos dependientes del sexo en todas las dosis examinadas. El herbicida 2,4-D en ratones macho C57BL/6 provocó aumentos y disminuciones de la abundancia microbiana relativa en función del género bacteriano. En conjunto, el estudio confirma que los pesticidas pueden reducir bacterias beneficiosas, aumentar bacterias perjudiciales y generar disbiosis intestinal, además de relacionarse con obesidad, diabetes, alteraciones inflamatorias, cambios genómicos, alteraciones morfológicas y funcionales intestinales, intolerancia a la glucosa y modificaciones en la biotransformación de pesticidas.

3.2.4. Djekkoun et al. (2021)

Analizaron los efectos de pesticidas organofosforados, organoclorados y benzimidazoles sobre la microbiota intestinal y el metabolismo. En ratas expuestas a clorpirifos se observó mayor número de bacterias nocivas, menor número de bacterias beneficiosas, aumento de flora potencialmente patógena y disminución de flora beneficiosa, junto con ausencia de impacto o aumento del peso corporal en adultos, baja masa corporal, menor longitud al nacer, cambios en los niveles de glucosa plasmática, alteraciones del perfil lipídico y diferencias significativas en el peso corporal. En ratones expuestos a clorpirifos se detectó aumento de flora potencialmente patógena,

disminución de flora beneficiosa y permeabilidad intestinal anormal. La exposición a diazinón en ratones produjo alteración de la composición del microbioma, deterioro del metabolismo energético, mayor receptividad de los machos a la translocación anormal y reducción del aumento del peso corporal. En ratones C57BL/6 expuestos a diazinón se observó aumento de flora potencialmente patógena, disminución de flora beneficiosa, aumento significativo de grasa corporal, hepática y epididimaria, así como elevación de triglicéridos y glucosa séricos. El monocrotopos se vinculó con aumento de flora potencialmente patógena, aumento de glucemia e intolerancia a la glucosa. Entre los organoclorados, el TCDF en ratas produjo disminución de flora beneficiosa, inflamación y alteraciones en la lipogénesis hepática, gluconeogénesis y glucogenólisis. El DDT en ratas se asoció con aumento de flora potencialmente patógena, disminución de flora beneficiosa, aumento de peso, incremento de glucosa e insulina en ayunas y metabolismo lipídico alterado. El PCP en ratones hembra produjo aumento de flora potencialmente patógena, disminución de flora beneficiosa y reducción del peso corporal. El CBZ en ratones se asoció con aumento de flora potencialmente patógena, disminución de flora beneficiosa, acumulación de lípidos hepáticos y aumento de triglicéridos, colesterol, HDL y LDL. En conjunto, el estudio evidencia que la exposición a pesticidas modula las poblaciones bacterianas y afecta la salud del huésped. La disbiosis inducida por estos compuestos se asocia con alteraciones semejantes a las del síndrome metabólico, translocación bacteriana, aumento de la permeabilidad intestinal, dismetabolismo microbiano, inflamación de bajo grado, desequilibrios en la homeostasis energética y mayor riesgo de patologías inflamatorias crónicas.

3.2.5. Utembe y Kamng'ona (2021)

Recogieron datos procedentes de otras revisiones, incluyendo estudios de casos y controles en humanos, estudios de cohorte en humanos y trabajos con ratas y ratones, centrados en glifosato, clorpirifos, piretroides, imidacloprid, diazinón y glufosinato de amonio. Este trabajo confirma la existencia de déficits cognitivos, disfunción de la capacidad motora, hipermovilidad relacionada con el estrés, disfunción de la interacción social, reducción de la capacidad de respuesta a la novedad social en adultos, deterioro de la memoria a corto plazo, cambios en conductas maternas y plasticidad neuronal, así como comportamiento estereotipado repetitivo. También se describen conductas similares a las del trastorno del espectro autista, cambios morfológicos en células gliales residentes en el cerebro, reducción de la permeabilidad de la barrera hematoencefálica, cambios en los niveles de ácidos grasos de cadena corta en el cerebro, regulación negativa

de neurotransmisores, inhibición de la acetilcolinesterasa, hipo o hipersensibilización de los sistemas colinérgicos y GABAérgicos, pérdida de neuronas dopaminérgicas de la sustancia negra e inflamación neuronal. Asimismo, se evidenció aumento de la transcripción de los genes de la subunidad GABA-A-A2 y del receptor M2, estimulación de la liberación de hormonas hipofisarias, inflamación sistémica mediada por TNF- y aumento del estrés oxidativo, lo que puede favorecer el envejecimiento y el desarrollo de enfermedades crónicas.

3.2.6. Meng et al. (2020)

Analizaron los efectos de distintos insecticidas y fungicidas sobre el microbioma intestinal, el metabolismo y la salud digestiva. El malatión, en ratones, produjo trastornos de la composición del microbiota intestinal y alteraciones genéticas relacionadas con la detección de quórum, aumento de la motilidad, patogenicidad y genes vinculados con los componentes de la pared celular. El diazinón se asoció con alteraciones del microbiota intestinal y trastornos del perfil metabólico. El clorpirifos produjo inflamación y permeabilidad intestinal anormal en ratones, resistencia a la insulina y obesidad; en ratas, se relacionó con retraso de la maduración del tracto digestivo. El diclorodifeniltricloroetano en ratas se asoció con aumento de peso y acumulación de lípidos. La permetrina en crías de rata generó discinesia y enfermedad intestinal. El carbendazim en ratones produjo trastornos del metabolismo lipídico e inflamación. El propamocarb se vinculó con trastornos del metabolismo de lípidos y ácidos biliares, trastornos del metabolismo enterohepático y posible enfermedad cardiovascular. El imazalil produjo inflamación del colon. El epoxiconazol en ratas se asoció con toxicidad hepática. El penconazol y sus enantiómeros, en ratones, produjeron trastornos del microbiota intestinal y perfiles metabólicos alterados. En conjunto, el estudio muestra que la exposición a pesticidas puede modificar la composición del microbioma intestinal y alterar la producción y función de metabolitos clave. Se identificaron trastornos metabólicos, resistencia a la insulina, obesidad, retraso en la maduración del tracto digestivo, alteración en la absorción de nutrientes, aumento de peso, acumulación de lípidos, inflamación, trastornos enterohepáticos, mayor riesgo cardiovascular, inflamación crónica del colon y toxicidad hepática.

3.2.7. Yuan et al. (2019)

Revisaron datos procedentes de otras revisiones y estudios con fluidos corporales humanos, ratones, ratones NOD, ratones macho adultos C57BL/6, ratas Sprague-Dawley,

estudios aleatorizados con mujeres embarazadas, estudios prospectivos aleatorizados en parejas madre-bebé, estudios doble ciego controlados con placebo en pacientes con diabetes tipo 2 y estudios de casos en humanos. Este trabajo concluye que los pesticidas pueden alterar la composición del microbioma intestinal y sus metabolitos. Los cambios en el microbioma y en sus metabolitos pueden causar efectos adversos en el huésped, afectando la transducción de señales extracelulares desde la membrana plasmática hacia la célula y a lo largo de la cadena intracelular, con impacto en la respuesta celular. Diferentes ácidos biliares pueden unirse a distintos receptores, lo que puede favorecer aterosclerosis, trastornos del metabolismo lipídico hepático y disbiosis por acumulación de grasa. Los ácidos grasos de cadena corta derivados de la fermentación microbiana de fibras pueden inhibir histonas deacetilasas y actuar como sustratos energéticos mediante la activación directa de receptores acoplados a proteína G. Su acción sobre receptores GPR en células grasas puede favorecer disbiosis por acumulación de grasa. Además, las células inmunitarias innatas activadas por bacterias endotóxicas pueden liberar citocinas proinflamatorias, induciendo inflamación de bajo grado e incluso inflamación neuronal. La alteración del equilibrio del microbioma intestinal y el aumento de la permeabilidad intestinal por la absorción de pesticidas constituyen factores de riesgo potenciales para la entrada de moléculas de mayor peso molecular, originando respuesta inflamatoria y, finalmente, inflamación de bajo grado. Asimismo, la acción de los ácidos grasos de cadena corta en el cerebro puede afectar el apetito y asociarse con obesidad y diabetes. En definitiva, los pesticidas pueden actuar sobre los microbios intestinales, alterar sus metabolitos, destruir la mucosa y las células intestinales, y provocar cambios patológicos al actuar sobre sitios receptores de diferentes tejidos y órganos.

3.3. EFECTOS DE LA EXPOSICIÓN A PESTICIDAS EN HUMANOS

Diversos estudios en humanos han evidenciado que la exposición a plaguicidas durante la gestación puede afectar al desarrollo fetal, generando una reducción en el peso al nacer. Así mismo, se ha identificado una asociación entre la proximidad de embarazadas a menos de 2000 metros de áreas donde se utilizan estos compuestos y un aumento del riesgo de trastorno del espectro autista en su descendencia. Este riesgo se incrementa con la magnitud de la exposición, siendo particularmente relevante durante el segundo y tercer trimestre de gestación, con un aumento del 30%. Además, se ha observado una correlación inversa entre la exposición prenatal a pesticidas y el desarrollo neuropsicológico, reflejada en la presencia de rasgos autistas en niños de 11 años expuestos in útero.

Por otro lado, la evidencia sugiere que la exposición a estos agentes químicos está relacionada con alteraciones metabólicas, incluyendo resistencia a la insulina y diabetes tipo 2, así como dislipemia, disfunción en la degradación de sustancias químicas, aterosclerosis, obesidad y trastornos del metabolismo de los lípidos en el hígado. También se ha reportado disbiosis intestinal vinculada a la acumulación de grasa. Añadido a ello es importante destacar la activación de la respuesta inflamatoria mediante la liberación de citocinas proinflamatorias y disfunciones en el sistema inmunológico.

En lo relativo al microbioma intestinal se produce alteración y disbiosis originando aumento de la permeabilidad en la membrana intestinal con todos los efectos que ello conlleva.

3.4. EFECTOS DE LA EXPOSICIÓN A PESTICIDAS EN MODELOS ANIMALES

3.4.1. Efectos de la exposición en ratas

Estudios en ratas han evidenciado múltiples alteraciones fisiológicas derivadas de la exposición a insecticidas y herbicidas. A nivel del sistema nervioso, se ha observado un incremento en la actividad de la vía excitatoria y una disminución en la actividad inhibitoria, junto con la pérdida de neuronas dopaminérgicas en la sustancia negra. En el ámbito endocrino y metabólico, se ha reportado un aumento de los niveles de insulina en ayunas, alteraciones en la función hepática que afectan la lipogénesis, gluconeogénesis, glucogenólisis y conducen a toxicidad hepática. Así mismo, se han identificado fenómenos como obesidad, incremento del peso corporal, mayor prevalencia de fenotipos de diabetes tipo 2 y disfunciones en los islotes pancreáticos con acumulación de lípidos.

Desde el punto de vista inmunológico, se ha evidenciado una disminución en la respuesta inmunitaria y alteraciones en los mecanismos que regulan la inflamación. A nivel intestinal, la exposición ha generado cambios estructurales y funcionales, con afectaciones micro y macroestructurales en el intestino derecho, reducción de géneros bacterianos beneficiosos, proliferación de especies potencialmente perjudiciales y un estado de disbiosis en el microbiota. Además, se han identificado efectos diferenciados según el sexo en todas las dosis analizadas.

Estos hallazgos sugieren que la exposición a estos compuestos podría tener un impacto significativo en la homeostasis de los sistemas nervioso, endocrino, inmunológico y gastrointestinal, lo que refuerza la necesidad de evaluar sus efectos en la salud humana.

3.4.2. Efectos de la exposición gestacional a pesticidas en la descendencia de ratas

Los estudios en crías de ratas cuyas madres fueron expuestas a pesticidas durante la gestación han revelado diversas alteraciones metabólicas, neurológicas y del desarrollo. A nivel metabólico, se ha identificado hiperlipidemia e hipoglucemia en la descendencia femenina, mientras que, a nivel neurológico, se han observado disfunciones que persisten a lo largo de la vida. Además, en fetos masculinos, se han reportado cambios en la transcripción del genoma de los genitales externos, así como un mayor riesgo de enfermedades prostáticas, obesidad y enfermedad renal.

El desarrollo del sistema digestivo también se ve afectado, evidenciándose retraso en la maduración del tracto gastrointestinal, discinesia y enfermedades intestinales. En el aparato reproductor, se han documentado alteraciones en los ovarios y anomalías en el parto. A nivel neuro inflamatorio y celular, la exposición prenatal se asocia con modificaciones en la respuesta inflamatoria y en la expresión de genes relacionados con el estrés oxidativo en el córtex y el cerebelo.

Así mismo, se han identificado alteraciones en el comportamiento de las crías, especialmente en su respuesta ante nuevas situaciones, con una exacerbación de fenotipos similares al Trastorno del Espectro Autista. Estos hallazgos refuerzan la evidencia de que la exposición prenatal a pesticidas puede tener efectos adversos a largo plazo en el desarrollo y la función fisiológica de la descendencia.

3.4.3. Efectos de la exposición en ratones

Los estudios en ratones han evidenciado que la exposición a pesticidas genera alteraciones significativas en el microbiota intestinal, incluyendo disbiosis y un incremento en la permeabilidad de la membrana intestinal. A nivel metabólico, se ha observado un deterioro del metabolismo energético, acompañado de reducción del aumento de peso en ambos sexos, disminución del peso corporal en hembras y translocación anormal, así como un aumento de la glucemia, intolerancia a la glucosa, acumulación de lípidos hepáticos y alteraciones en el perfil lipídico, con elevación de triglicéridos, colesterol, HDL y LDL.

Desde un enfoque genético y microbiológico, la exposición afecta la regulación del quorum sensing, aumentando la motilidad y patogenicidad bacteriana, junto con modificaciones en genes relacionados con la estructura de la pared celular y la biotransformación de pesticidas. Así mismo, se han registrado trastornos del metabolismo enterohepático, alteraciones en los ácidos biliares, resistencia a la insulina y una mayor inflamación sistémica, asociada a un mayor riesgo de enfermedad cardiovascular y colitis.

A nivel del sistema nervioso central, se ha constatado una disminución en la regulación de neurotransmisores, inflamación neuronal, deterioro en la actividad locomotora, alteraciones en la memoria a corto plazo y comportamientos similares al trastorno del espectro autista.

En términos de composición corporal, los ratones macho presentan una mayor susceptibilidad a la translocación anormal, junto con un incremento significativo en la grasa corporal, hepática y epididimaria. Se ha reportado también un aumento de los niveles séricos de triglicéridos y glucosa, así como una exacerbación de la intolerancia a la glucosa. Además, se han identificado cambios en la expresión génica vinculados con las vías metabólicas y la intolerancia a la glucosa.

Estos hallazgos sugieren que la exposición a pesticidas tiene un impacto multisistémico, afectando el metabolismo, la homeostasis inmune y la función neurológica, con consecuencias diferenciadas según el sexo y el tiempo de exposición.

4. DISCUSIÓN

El presente estudio tenía como objetivo inicial examinar la evidencia científica disponible sobre las alteraciones inducidas por los plaguicidas en los seres humanos. Para ello, se llevó a cabo una revisión de estudios empíricos realizados tanto en poblaciones humanas como de estudios experimentales en modelos animales que presentan similitudes genéticas, biológicas y conductuales con los seres humanos. Este enfoque permite prever los efectos de los plaguicidas en humanos bajo condiciones ambientales análogas a las establecidas en los ensayos experimentales realizados con animales.

A partir del análisis realizado en este trabajo de los estudios sobre pesticidas, se puede afirmar que la exposición a estos productos en seres humanos, especialmente durante la gestación, está asociada con efectos adversos en el desarrollo fetal, el metabolismo y la función del sistema inmunológico. Se trata de efectos negativos significativos en el desarrollo fetal, incluyendo el sistema neurológico, el metabolismo y el sistema inmunológico. Por otra parte, es importante resaltar la reducción del peso al nacer, que es un indicador conocido de posibles complicaciones en el desarrollo y la salud de los recién nacidos. Este dato es particularmente relevante dado que la reducción del peso al nacer está asociada con un mayor riesgo de enfermedades crónicas, como enfermedades cardiovasculares, metabólicas y neurológicas, a lo largo de la vida, también identificado en animales. La relación entre la exposición a pesticidas y el bajo peso al nacer sugiere que los compuestos químicos presentes en estos productos pueden interferir con los mecanismos biológicos normales del embarazo, afectando la nutrición

y el crecimiento fetal. Los estudios en modelos animales descritos en la Tabla 1 son coincidentes con estos resultados.

Por otra parte, es importante destacar la relación entre la exposición a pesticidas y el aumento de la probabilidad de desarrollar trastorno del espectro autista, fundamentalmente cuando la exposición ocurre durante el segundo y tercer trimestre de la gestación. El hallazgo de que el riesgo aumenta en un 30% durante estos períodos en la gestación sugiere que los efectos de la exposición prenatal no son simplemente coincidencias dado que también se alinean con las investigaciones que se han llevado a cabo en modelos animales. Además, la identificación de rasgos del espectro autista en niños de 11 años como consecuencia de la exposición prenatal a pesticidas evidencia que los efectos de estos compuestos no se limitan al corto plazo. Dichos efectos, que se manifiestan en la infancia tardía, tienen implicaciones significativas para el desarrollo neuropsicológico a largo plazo. Estudios en modelos animales han corroborado esta relación, lo que añade una dimensión alarmante a la problemática. No solo se ve comprometido el bienestar inmediato del feto, sino que también se afectan de manera sustancial las funciones cognitivas y emocionales del individuo durante su crecimiento y en la vida adulta.

La asociación de la exposición a plaguicidas con resistencia a la insulina, diabetes tipo 2, obesidad y dislipemia señala un patrón característico de trastornos metabólicos que afectan a una parte significativa de la población mundial, especialmente en sociedades occidentales. La resistencia a la insulina es uno de los mecanismos centrales en el desarrollo de la diabetes tipo 2, se ha asociado con la inflamación crónica de bajo grado y el estrés oxidativo, factores que se mencionan como consecuencias de las alteraciones en el metabolismo en el caso de los estudios realizados en ratas y ratones. Esto puede implicar que los trastornos metabólicos no son solo el resultado de un exceso calórico, sino también de un contexto inflamatorio subyacente que dificulta la acción de la insulina y exacerba la acumulación de grasa en diferentes tejidos.

En lo relativo a los trastornos hepáticos y la acumulación de grasa en el hígado sugiere que podría existir enfermedad hepática grasa no alcohólica, una condición cada vez más prevalente y que está vinculada con la obesidad y el síndrome metabólico. Esta acumulación de grasa, además de ser un marcador de un trastorno metabólico, puede predisponer al hígado a un daño más severo, como la fibrosis hepática y, eventualmente, la cirrosis. Los efectos de esta disfunción hepática en el metabolismo sistémico deben ser considerados en el contexto de la dislipemia, ya que el hígado juega un papel central en el metabolismo de las grasas y su liberación en la sangre.

También está intrínsecamente relacionado con los trastornos metabólicos anteriores, la aterosclerosis, el proceso de acumulación de placas de colesterol en las arterias, es una de las principales causas de enfermedades cardiovasculares. El vínculo entre la dislipemia, la resistencia a la insulina y la aterosclerosis subraya cómo las alteraciones en el metabolismo de las grasas y la glucosa pueden contribuir a la enfermedad cardiovascular, que continúa siendo la principal causa de mortalidad en muchas regiones del mundo. Los estudios en modelos animales también han puesto de manifiesto estas alteraciones.

En cuanto al impacto de la activación de la respuesta inflamatoria y la liberación de citocinas proinflamatorias en la salud es otro aspecto que resaltar. La inflamación crónica de bajo grado es una característica común en muchas enfermedades metabólicas y se cree que juega un papel fundamental en la progresión de la resistencia a la insulina y la obesidad. Las citocinas proinflamatorias, como la interleucina-6 (IL-6) y el factor de necrosis tumoral alfa (TNF- α), son conocidas por alterar la señalización de la insulina y contribuir al daño tisular. Esta activación inflamatoria no solo afecta el metabolismo, sino que también puede tener efectos sistémicos en los órganos y tejidos, exacerbando las enfermedades cardiovasculares y la disfunción endotelial.

En lo concerniente a la disbiosis intestinal, producida por el desequilibrio en el microbioma intestinal, se ha demostrado que está vinculada con diversas enfermedades metabólicas, como la diabetes tipo 2, la obesidad y la enfermedad hepática también en los modelos animales. Por otra parte, la disbiosis intestinal induce una mayor permeabilidad intestinal, de manera que permite la translocación de endotoxinas bacterianas al torrente sanguíneo. Estas endotoxinas activan el sistema inmunológico, amplificando la respuesta inflamatoria, y contribuyen a la resistencia a la insulina y a la acumulación de grasa en el organismo. También y como consecuencia de la disbiosis puede resultar un daño estructural en el intestino, afectando la absorción de nutrientes y la protección contra patógenos. La disbiosis está asociada con una amplia gama de trastornos, incluyendo enfermedades digestivas, trastornos metabólicos, infecciones y enfermedades autoinmunes, lo que refuerza la noción de que los pesticidas pueden tener un impacto sistémico en la salud intestinal y más allá.

Este fenómeno de permeabilidad intestinal incrementada está siendo cada vez más estudiado por su relación con enfermedades metabólicas y autoinmunitarias. La idea de que el microbioma intestinal juega un papel central en la regulación metabólica y en la inflamación sistémica es un área emergente de la investigación. La alteración del equilibrio microbiano intestinal puede contribuir a un círculo vicioso de inflamación crónica

e interferir con las funciones metabólicas normales, aumentando la susceptibilidad a trastornos como la obesidad y la diabetes y también a trastornos autoinmunes.

El daño hepático, junto con un mayor riesgo de enfermedades inflamatorias como la colitis y la enfermedad cardiovascular, destaca la influencia negativa de los pesticidas sobre la salud general, particularmente en órganos clave como el hígado y el sistema cardiovascular.

Respecto a los estudios en modelos animales son cruciales para entender los efectos biológicos y fisiológicos de la exposición a pesticidas, ya que ofrecen información valiosa sobre los mecanismos subyacentes que podrían tener implicaciones en la salud humana. El análisis de los efectos de la exposición a pesticidas en modelos animales, como ratas y ratones, revela una serie de alteraciones fisiológicas en diversos sistemas biológicos, que abarcan desde el sistema nervioso hasta el inmunológico y el gastrointestinal. Estos estudios no solo subrayan los impactos directos de los pesticidas, sino también las posibles repercusiones a largo plazo sobre la salud y el bienestar de los seres vivos, incluidos los humanos.

Los estudios expuestos en la tabla 1 respaldan los resultados de los estudios empíricos realizados en humanos y ponen en relevancia los efectos adversos de los pesticidas en ratas adultas, ratones y en la descendencia de ambos cuando están expuestos durante la gestación.

5. CONCLUSIONES

En resumen, respecto a los resultados encontrados en humanos se destacan los efectos metabólicos, sistémicos e inmunológicos interconectados que afectan la salud humana. La resistencia a la insulina, la dislipemia, la inflamación crónica y la disbiosis intestinal representan factores de riesgo interrelacionados que requieren una atención multidisciplinaria para su tratamiento y prevención. El estudio de estos procesos patológicos no solo ofrece perspectivas sobre las enfermedades metabólicas, sino que también abre un campo de investigación para la intervención en el microbioma intestinal y la modulación de la respuesta inflamatoria como estrategias clave.

Se ha evidenciado que los pesticidas generan efectos adversos en el sistema inmune, nervioso y el microbioma intestinal, lo que puede contribuir a enfermedades inflamatorias, metabólicas y degenerativas del sistema nervioso central. Los efectos sobre el desarrollo fetal pueden predisponer a enfermedades crónicas en la vida adulta y también en el neurodesarrollo, disbiosis intestinal en etapas tempranas, obesidad y otros trastornos metabólicos y endocrinos.

Ante lo expuesto anteriormente se evidencia la necesidad de implementar políticas públicas que regulen la exposición a estos compuestos para proteger la salud humana en el corto y largo plazo. Existe consenso respecto a los estudios que demuestran la relación entre la exposición a pesticidas y una variedad de efectos adversos, las políticas públicas que abordan este problema siguen siendo insuficientes en muchos países.

Se abre así un debate más amplio sobre la regulación y el control de estos productos. Si bien los estudios epidemiológicos han demostrado efectos negativos claros, la adopción de políticas públicas que restrinjan o regulen el uso de pesticidas en áreas agrícolas, en particular aquellas cercanas a zonas residenciales, siguen siendo un desafío.

A pesar de la evidencia científica, persisten intereses económicos y políticos que dificultan una regulación más estricta, lo que obliga a preguntarnos: ¿Hasta qué punto los intereses comerciales pueden prevalecer sobre el bienestar de la población?

Esta es una pregunta crucial que resolver, el impacto económico desde esta perspectiva es significativo, ya que los costes asociados a los efectos generados incluyen no solo el gasto en atención socio sanitaria y terapias especializadas, sino también la posible reducción en la capacidad productiva y la calidad de vida de los individuos afectados. Esto subraya la necesidad de políticas públicas orientadas a la regulación del uso de pesticidas y a la implementación de estrategias preventivas que minimicen los riesgos para la salud pública y el desarrollo infantil. La consideración del impacto económico desde este punto de vista es grande, por tanto, los legisladores, los profesionales de la salud y la sociedad en general deben reconocer y conocer la importancia de reducir la exposición a pesticidas.

Esto debería implicar la implementación de políticas más estrictas sobre el uso de pesticidas en la agricultura, el establecimiento de límites más bajos para la exposición ocupacional y la educación sobre los riesgos asociados con estos productos. Además, se deben promover alternativas más seguras y sostenibles en la agricultura, como el uso de pesticidas orgánicos y técnicas de control biológico.

La agroecología debería considerarse como la respuesta al problema planteado puesto que, al promover prácticas agrícolas basadas en principios ecológicos, reduce la dependencia de agroquímicos sintéticos y fomenta el equilibrio natural de los ecosistemas agrícolas. Además, esta forma de cultivo fortalece la seguridad alimentaria y la calidad nutricional de los alimentos al evitar la acumulación de residuos tóxicos en los productos agrícolas que dan lugar a trastornos endocrinos, alteraciones neurológicas, disbiosis y enfermedades autoinmunes. Su enfoque integral, basado en la interacción armónica entre

la agricultura y los ecosistemas naturales, permite avanzar hacia modelos de producción sostenibles que protejan tanto el bienestar de las personas como la biodiversidad.

La protección de las futuras generaciones frente a estos riesgos debe ser una prioridad en las agendas de salud pública a nivel global.

REFERENCIAS

Álvarez, J., Real, J. M. F., Guarner, F., Gueimonde, M., Rodríguez, J. M., de Pipaon, M. S., & Sanz, Y. (2021). *Microbiota intestinal y salud. Gastroenterología y Hepatología*, 44(7), 519-535.

Chen, Y., Deng, Y., Wu, M., Ma, P., Pan, W., Chen, W., Zhao, L., & Huang, X. (2025). Impact of pesticides exposure and type 2 diabetes risk: a systematic review and meta-analysis. *Endocrine*, 87(2), 448–458.

Djekoun, N., Lalau, J. D., Bach, V., Depeint, F., & Khorsi-Cauet, H. (2021). Chronic oral exposure to pesticides and their consequences on metabolic regulation: Role of the microbiota. *European Journal of Nutrition*, 60(8), 4131-4149.

Galarza, C. R., & Cruz, P. G. (2024). Guía para realizar estudios de revisión sistemática cuantitativa. *CienciaAmérica: Revista de divulgación científica de la Universidad Tecnológica Indoamérica*, 13(1), 1-6.

Gambarte, P. C. K., & Wolansky, M. J. (2022). The gut microbiota as a biomarker for realistic exposures to pesticides: A critical consideration. *Neurotoxicology and Teratology*, 91, 107074.

Gillois, K., Lévêque, M., Théodorou, V., Robert, H., & Mercier-Bonin, M. (2018). Mucus: An Underestimated Gut Target for Environmental Pollutants and Food Additives. *Microorganisms*, 6(2), 53. <https://doi.org/10.3390/microorganisms6020053>

Groh, K. J., Geueke, B., & Muncke, J. (2017). Food contact materials and gut health: Implications for toxicity assessment and relevance of high molecular weight migrants. *Food and Chemical Toxicology*, 109, 1-18.

James, D., Wolff, R., & Wittman, H. (2023). Agroecology as a philosophy of life. *Agriculture and Human Values*, 40(4), 1437-1450. doi:<https://doi.org/10.1007/s10460-023-10455-1>

Ma, X., Zhang, Y., Guan, M., Zhang, W., Tian, H., Jiang, C., Tan, X., & Kang, W. (2021). Genotoxicity of chloroacetamide herbicides and their metabolites *in vitro* and *in vivo*. *International journal of molecular medicine*, 47(6), 103.

Meng, Z., Liu, L., Yan, S., Sun, W., Jia, M., Tian, S., ... & Zhu, W. (2020). Gut microbiota: a key factor in the host health effects induced by pesticide exposure?. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 68(39), 10517-10531.

Organización Mundial de la Salud (1948). *Carta Constitucional*. Aprobada en 1948.

Prakash, S., Rodes, L., Coussa-Charley, M., & Tomaro-Duchesneau, C. (2011). Gut microbiota: next frontier in understanding human health and development of biotherapeutics. *Biologics: targets and therapy*, 71-86.

Rajilić-Stojanović, M., & De Vos, W. M. (2014). The first 1000 cultured species of the human gastrointestinal microbiota. *FEMS microbiology reviews*, 38(5), 996-1047.

Roberts, J. R., Dawley, E. H., & Reigart, J. R. (2019). Children's low-level pesticide exposure and associations with autism and ADHD: a review. *Pediatric research*, 85(2), 234-241.

Ruiz Álvarez, V., Puig Peña, Y., & Rodríguez Acosta, M. (2010). Microbiota intestinal, sistema inmune y obesidad. *Revista Cubana de Investigaciones Biomédicas*, 29(3), 364-397.

Utembe, W., & Kamng'ona, A. W. (2021). Gut microbiota-mediated pesticide toxicity in humans: Methodological issues and challenges in the risk assessment of pesticides. *Chemosphere*, 271, 129817.

Wei, Y., Wang, L., & Liu, J. (2023). The diabetogenic effects of pesticides: evidence based on epidemiological and toxicological studies. *Environmental Pollution*, 331, 121927.

Yang, Y., Zhou, S., Xing, Y., Yang, G., & You, M. (2023). Impact of pesticides exposure during neurodevelopmental period on autism spectrum disorders—A focus on gut microbiota. *Ecotoxicology and environmental safety*, 260, 115079.

Yuan, X., Pan, Z., Jin, C., Ni, Y., Fu, Z., & Jin, Y. (2019). Gut microbiota: An underestimated and unintended recipient for pesticide-induced toxicity. *Chemosphere*, 227, 425-434.

Yue, Y., Sun, X., Tian, S., Yan, S., Sun, W., Miao, J., ... & Zhu, W. (2024). Multi-omics and gut microbiome: Unveiling the pathogenic mechanisms of early-life pesticide exposure. *Pesticide biochemistry and physiology*, 199, 105770.

CAPÍTULO 2

ACTITUDES AMBIENTALES EN ESTUDIANTES DEL NIVEL MEDIO SUPERIOR AL NOROESTE DE TAMAULIPAS

Data de submissão: 11/05/2026

Data de aceite: 28/05/2026

Catalina Vargas Ramos

Universidad Autónoma de Tamaulipas
México

<https://orcid.org/0000-0001-5001-1128>

Graciela Hernández Moreno

Universidad Autónoma de Tamaulipas
México

<https://orcid.org/0009-0004-4484-7817>

Ma. De la Cruz Galindo Ceja

Universidad Autónoma de Tamaulipas
México

<https://orcid.org/0009-0008-0947-150X>

Alan León González Almaguer

Universidad Autónoma de Tamaulipas
México

<https://orcid.org/0000-0001-9786-1736>

Jorge Alejandro Gallegos de la Cruz

Universidad Autónoma de Tamaulipas
México

<https://orcid.org/0009-0007-0934-2452>

RESUMEN: Objetivo: Determinar las actitudes ambientales en estudiantes del nivel medio superior al noroeste de Tamaulipas.

Metodología: El instrumento utilizado fue “Cuestionario de Actitudes Ambientales (CAAM). **Resultados:** Los resultados evidenciaron un predominio de actitudes medio conscientes hacia el medio ambiente en los estudiantes evaluados. Según la edad, los grupos de 16, 17 y 18 años presentaron principalmente niveles medio conscientes, mientras que el único participante de 19 años mostró un nivel consciente ambientalmente. En relación con el género, tanto hombres como mujeres reflejaron predominancia de actitudes medio conscientes, aunque el grupo masculino mostró ligeramente mayores niveles de conciencia ambiental. Asimismo, en las especialidades de Inglés e Informática predominó el nivel medio consciente, destacando Informática por presentar una mayor proporción de estudiantes conscientes ambientalmente. **Conclusiones:** Se concluye que los estudiantes presentan predominantemente actitudes medio conscientes hacia el medio ambiente, independientemente de la edad, género y especialidad. No obstante, el género masculino y la especialidad de Informática evidenciaron una mayor tendencia hacia niveles de conciencia ambiental más altos. Estos resultados resaltan la necesidad de fortalecer estrategias de educación ambiental en la población estudiantil.

PALABRAS CLAVE: actitudes ambientales; educación ambiental; desarrollo sustentable; problemática ambiental.

ENVIRONMENTAL ATTITUDES AMONG HIGH SCHOOL STUDENTS IN NORTHWESTERN TAMAULIPAS

ABSTRACT: Objective: To determine the environmental attitudes of high school students in northwestern Tamaulipas. Methodology: The instrument used was the Environmental Attitudes Questionnaire (CAAM). Results: The results showed a predominance of moderately conscious attitudes toward the environment among the students evaluated. By age, the 16, 17, and 18-year-old groups primarily presented moderately conscious levels, while the single 19-year-old participant showed a highly conscious level of environmental awareness. Regarding gender, both men and women reflected a predominance of moderately conscious attitudes, although the male group showed slightly higher levels of environmental awareness. Likewise, the moderately conscious level predominated in the English and Computer Science majors, with Computer Science standing out for having a higher proportion of environmentally conscious students. Conclusions: It is concluded that students predominantly present moderately conscious attitudes toward the environment, regardless of age, gender, and major. However, the male gender and the Computer Science major showed a greater tendency toward higher levels of environmental awareness. These results highlight the need to strengthen environmental education strategies among the student population.

KEYWORDS: environmental attitudes; environmental education; sustainable development; environmental problems.

1. INTRODUCCIÓN

Se nombra por primera vez el término ambiental en 1972 en Estocolmo, Suecia (Martos y Medina, 2021), que debido al avance tecnológico que se tiene hoy en día (Casa et al., 2019), y desde hace décadas que inicio la Revolución industrial se han presentado problemas ambientales (Chumbe, 2021), como el calentamiento global, el efecto invernadero, consecuencia de la contaminación ambiental, producida principalmente por todos los contaminantes primarios, realizados por actividades antropogénicas, haciendo énfasis en las actitudes ambientales de la población (Casa et al., 2019).

Las actitudes son las predisposiciones de algún estímulo debido a una pregunta, y se presentan: *cognitivo*, siendo las creencias y el conocimiento, *afectivo*, implicando emociones y sentimientos ya sean positivos o negativos y *reactivo*, que es la predisposición de actuar, por lo que las actitudes ambientales son directamente las acciones que tiene para el cuidado del medio ambiente (Chumbe, 2021), siendo de gran interés en universitarios ya que es importante para conducir a una sociedad responsable y sostenible, debido a que son estudiantes capaces de aplicar conocimientos, administrar recursos, cuidar la energía y realizar prácticas sostenibles, permitiendo hacer patrones de comportamientos en beneficio al medio ambiente, con esto se fomenta una actitud positiva, ya que promueve un estabilidad emocional, porque se ha demostrado que las

personas que las practican mejoran su sentido de comunidad y la salud mental (Farfán et al., 2024).

Una de la manera en que se puede fomentar las actitudes ambientales es por medio de la educación ambiental, ya que es importante para los países poder inculcar el desarrollo sostenible, el cual debe de ser inculcado por medio del gobierno a través de los programas educativos (Martos y Medina, 2021).

La educación ambiental da inicio en los años 60, debido a una preocupación de los problemas ambientales, siendo la encargada de generar valores y actitudes a favor del medio ambiente, ya que serán guías para conducir hacia la estabilidad y equilibrio ecológico (Mendoza et al., 2019). En el nivel superior es muy importa para poder formar y guiar a estudiantes preparados y comprometidos para proponer soluciones y tratar de poner fin a la degradación de los ecosistemas.

Agregar la Educación Ambiental en el currículo desde el sistema es muy importante en la vida de las personas y en el desarrollo de las sociedades (Ariza y Rueda, 2016), ya que formaran estudiantes de cambios, capaces de fomentar cultura proambiental, con el fin de proteger el medio ambiente para dar cumplimiento al desarrollo sustentable (Farfán et al., 2024). El desarrollo sustentable pretende entender y unir los tres escenarios como lo social, ambiental y económico, para poder proteger el mundo para las futuras generaciones, por lo que proponen en Río de Janeiro en el 2012, 17 objetivos para alcanzar la meta en el 2030, en general los objetivos tratan de lograr una seguridad alimentaria, erradicar el hambre, igualdad de género, educación de calidad, promover la paz, energía sustentable, entre otros. Para poder alcanzarlos se necesita la unión de la sociedad y el gobierno (Moreno et al., 2019).

Serna et al. (2016), mencionan que la sociedad actúa en beneficio al planeta, pero lo hace por medio de información, no por formación, por lo que no se forman patrones, debido a que no se generan análisis en las conductas de la población, por lo que hace que los riesgos de una problemática ambiental aumenten, sugiriendo que se debe de impartir por formación, para generar competencias en los futuros profesionistas para crear modelos de cambios amigables con el medio ambiente.

Chumbe (2021), menciona en su investigación Caracterización de la actitud ambiental en estudiantes ingresantes a la universidad, donde aplico el instrumento Escala Ambiental ACHR a 128 estudiantes, donde encontró que tiene actitudes ambientales, pero no descarta la educación continua en términos ambientales.

Al igual Casa et al, (2019) en su estudio Percepción sobre contaminación ambiental y actitudes en estudiantes universitarios, aplicaron el instrumento Percepción

de contaminación ambiental y escala de actitudes ambientales a una población de 113 estudiantes, donde encontraron que la contaminación ambiental tiene relación con las actitudes ambientales de los estudiantes.

Pérez – Franco et al, (2018), en su investigación “Actitudes ambientales al final de la ESO”. Un estudio diagnóstico con alumnos de Secundaria de la Región de Murcia, aplicaron el instrumento ROSE, fue aplicado a 690 estudiantes de secundaria, donde encontraron que el porcentaje mayor en las actitudes ambientales fue en el género femenino, el cual servirá para motivar y mejorar al género masculino, por lo que es muy importante fomentar la lectura en educación ambiental y poder modificar las conductas y formar estudiantes responsables en beneficios del medio ambiente y con la capacidad de realizar críticas formales para proponer posibles soluciones ante la problemática ambiental.

Pero, Villafuerte (2020), en su estudio Conocimientos, actitudes y disposición para el desarrollo sostenible en la universidad, encontrando que la población estudiantil, no percibe de interés e importancia el desarrollo sustentable a pesar que está en sus programas educativos, ya que ven la asignatura como algo fácil y se preocupan por sus demás asignaturas, por lo que la única manera de actuar es que el docente pida evidencias de su forma de actuar a cambio de otorgarles puntos extras en su calificación, por eso la importancia de que todo el personal tanto docentes, directivos, administrativos y estudiantes conozcan este tipo de temas ambientales para poder actuar desde el pilar hasta la base.

Por eso la importancia de conocer las actitudes ambientales de los estudiantes del nivel medio superior al noroeste de Tamaulipas.

2. METODOLOGÍA

Se recopiló información por medio de un instrumento llamado “Cuestionario de Actitudes Ambientales (CAAM). Este instrumento consta de 17 ítems, con respuesta tipo Likert, que van desde “totalmente de acuerdo” hasta “total desacuerdo”, con valor de 5 hasta 1 respectivamente. Los puntajes se calcularon en cinco dimensiones según su rango: Muy consciente = 85-69, Consciente = 68-52, Medio consciente = 51-35, Poco consciente = 34-18 y Nada consciente = 17-0, lo que significa que, a mayor puntaje, mayor actitud ambiental. Los datos se procesaron en el paquete estadístico Statistical Package for the Social Sciences, (SPSS) versión 24.0.

El instrumento fue aplicado a estudiantes del nivel medio superior de la especialidad de inglés con el 34% ($f=42$) y de la especialidad de informática con el 66%

($f=83$), conformando una muestra de total de 125 estudiantes, del género femenino con el 72% ($f=90$) y del género masculino con el 28% ($f=35$). El rango de edad de los estudiantes fue de 16 años con el 36% ($f=45$), 17 años con el 61% ($f=77$), 18 años con el 2% ($f=3$) y de 19 años 1% ($f=1$).

3. RESULTADOS

Al evaluar el nivel de las actitudes ambientales en función de la edad, se encontró que los estudiantes de 16 años presentaron una mayor frecuencia en el nivel medio consciente con un 20% ($f = 25$), mientras que en el nivel consciente ambientalmente se obtuvo un 16% ($f = 20$). En este grupo, la media fue de 2.44 y la desviación estándar de 0.50, lo que indica una tendencia predominante hacia actitudes medio conscientes con una dispersión moderada de las respuestas.

En los estudiantes de 17 años se observó una mayor frecuencia en el nivel medio consciente con un 48% ($f = 60$), seguido del nivel consciente ambientalmente con un 13% ($f = 17$). Asimismo, se obtuvo una media de 2.22 y una desviación estándar de 0.42, evidenciando predominio de actitudes medio conscientes y homogeneidad en las respuestas.

Respecto a los estudiantes de 18 años, el 100% ($f = 2$) se ubicó en el nivel medio consciente, obteniéndose una media de 2.00 y una desviación estándar de 0.00, lo que refleja uniformidad total en las respuestas.

Finalmente, en la edad de 19 años, el 100% ($f = 1$) se encontró en el nivel consciente ambientalmente, con una media de 3.00 y desviación estándar de 0.00, indicando ausencia de variabilidad debido a que solo se registró un participante en este rango de edad (Tabla 1).

Tabla 1. Actitudes ambientales de los estudiantes de acuerdo con la edad.

Actitud ambiental	16 años f (%)	17 años f (%)	18 años f (%)	19 años f (%)
Medio consciente	25 (20%)	60 (48%)	2 (100%)	0
Consciente ambientalmente	20 (16%)	17 (13%)	0 (0%)	1 (100%)
Muy consciente ambientalmente	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)

Nota: Fuente propia.

En cuanto a las actitudes ambientales según el género, se observó que en el grupo femenino predomina el nivel medio consciente con el 77.8%, seguido del nivel consciente ambientalmente con el 22.2%, sin registros en el nivel muy consciente ambientalmente. La media obtenida fue de 2.22 con una desviación estándar de 0.42,

lo que indica una tendencia predominante hacia actitudes medio conscientes con baja dispersión en las respuestas.

En el caso del género masculino, también predominó el nivel medio consciente con el 57.1%, seguido del nivel consciente ambientalmente con el 40.0% y un pequeño porcentaje en el nivel muy consciente ambientalmente (2.9%). La media fue de 2.46 con una desviación estándar de 0.56, lo que refleja una ligera tendencia mayor hacia actitudes más conscientes en comparación con el grupo femenino, aunque con mayor variabilidad en las respuestas.

En general, ambos grupos presentan predominancia de actitudes medio conscientes hacia el medio ambiente (Tabla 2).

Tabla 2. Actitudes ambientales por género.

Actitudes ambientales	Femenino f (%)	Masculino f (%)
Medio consciente	70 (77.8%)	20 (57.1%)
Consciente ambientalmente	20 (22.2%)	14 (40.0%)
Muy consciente ambientalmente	0 (0%)	1 (2.9%)

Nota: Fuente propia.

En relación con las actitudes ambientales según la especialidad, se observó que en el grupo de inglés predomina el nivel medio consciente con el 66.7% ($f = 28$), seguido del nivel consciente ambientalmente con el 33.3% ($f = 14$), sin registros en el nivel muy consciente ambientalmente.

En la especialidad de Informática, también predomina el nivel medio consciente con el 57.8% ($f = 48$), seguido del nivel consciente ambientalmente con el 41.0% ($f = 34$), y un mínimo porcentaje en el nivel muy consciente ambientalmente con el 1.2% ($f = 1$).

En términos generales, ambas especialidades presentan una tendencia predominante hacia actitudes medio conscientes respecto al medio ambiente, aunque la especialidad de Informática muestra una mayor presencia relativa del nivel consciente ambientalmente en comparación con inglés (Tabla 3)

Tabla 3. Actitudes ambientales de acuerdo con la especialidad.

Actitudes ambientales	Inglés f (%)	Informática f (%)
Medio consciente	28 (66.7%)	48 (57.8%)
Consciente ambientalmente	14 (33.3%)	34 (41.0%)
Muy consciente ambientalmente	0 (0%)	1 (1.2%)
Total	42 (100%)	83 (100%)

Nota: Fuente propia.

4. DISCUSIONES

Los resultados obtenidos evidencian que las actitudes ambientales de los estudiantes se ubican predominantemente en un nivel medio consciente, lo cual coincide con lo planteado por Chumbe, quien señala que los estudiantes presentan actitudes ambientales favorables, aunque aún es necesaria la educación continua para fortalecer conductas responsables hacia el medio ambiente. Este resultado refleja que, aunque existe conciencia ambiental en la población estudiantil, todavía no se alcanza un nivel altamente comprometido con prácticas sostenibles.

Asimismo, los resultados respaldan lo expuesto por Casa y colaboradores, quienes encontraron relación entre la percepción de la contaminación y las actitudes ambientales en estudiantes universitarios. La preferencia de actitudes medio conscientes podría estar influenciado por el contexto actual de problemática ambiental derivada de actividades antropogénicas y del avance tecnológico, tal como mencionan diversos autores. En este sentido, la educación ambiental continúa siendo un elemento clave para promover cambios conductuales y fortalecer el compromiso ambiental.

En cuanto al género, aunque ambos grupos mostraron predominio de actitudes medio conscientes, el género masculino presentó una ligera tendencia hacia niveles más altos de conciencia ambiental. Este resultado difiere parcialmente de lo reportado por Pérez-Franco y colaboradores, quienes identificaron mayores actitudes ambientales en el género femenino. Las diferencias podrían atribuirse a factores socioculturales, contextuales o al tipo de población estudiada.

Respecto a la especialidad, los estudiantes de Informática mostraron una mayor proporción de actitudes conscientes ambientalmente en comparación con la especialidad de inglés. Esto podría relacionarse con una mayor exposición a herramientas tecnológicas e información ambiental, aunque también coincide con lo señalado por Villafuerte, quien menciona que muchos estudiantes no perciben el desarrollo sostenible como un tema prioritario, aun cuando forma parte de los programas educativos. Por ello, resulta fundamental fortalecer estrategias de educación ambiental que promuevan no solo información, sino también formación y prácticas sostenibles permanentes.

5. CONCLUSIONES

En términos generales, los resultados evidencian que las actitudes ambientales de los estudiantes se concentran principalmente en el nivel medio consciente, independientemente de la edad, el género o la especialidad.

En el análisis por edad, se observó que los grupos de 16 y 17 años presentan una mayor frecuencia en el nivel medio consciente, mientras que los estudiantes de 19 años alcanzan el nivel consciente ambientalmente. Sin embargo, en todos los rangos de edades predomina una tendencia hacia actitudes intermedias, con baja presencia del nivel muy consciente.

En relación con el género, tanto hombres como mujeres presentan predominio del nivel medio consciente. No obstante, el grupo masculino muestra ligeramente una mayor proporción en el nivel consciente ambientalmente y una media un poco más alta, lo que sugiere una leve diferencia a favor de mayor conciencia ambiental en este grupo, aunque sin una variabilidad significativa entre ambos sexos.

Respecto a la especialidad, tanto en inglés como en Informática se mantiene la misma tendencia general hacia el nivel medio consciente. Sin embargo, la especialidad de Informática presenta una mayor proporción en el nivel consciente ambientalmente y es la única que registra casos en el nivel muy consciente ambientalmente, lo cual sugiere una ligera ventaja en el nivel de conciencia ambiental en comparación con inglés.

REFERENCIAS

Ariza, C. & Rueda, L. (2016). La educación ambiental: una mirada desde el contexto universitario. *Boletín virtual*. Vol 5(3). Disponible en: Vista de La educación ambiental: una mirada desde el contexto universitario

Casa, M., Mamani, F & Cusi, L. (2019). Actitudes ambientales en estudiantes del nivel secundario. *Revista Innova Educación*. Vol. 1(2). Disponible en: Vista de Actitudes ambientales en estudiantes del nivel secundario

Casa, M., Cusi, L. & Vilca, L. (2019). Percepciones sobre contaminación ambiental y actitudes en estudiantes universitarios. *Revista Innova Educación*. Vol. 1(3). Disponible en: Vista de Percepciones sobre contaminación ambiental y actitudes en estudiantes universitarios

Chumbe, A. (2021). Caracterización de la actitud ambiental en estudiantes ingresantes a la universidad. *Revista EDUSER*. Vol. 8. pp. 21-34. Disponible en: <https://doi.org/10.18050/eduser.v8i1.930>

Farfán, D., Soria, Y. & Farfán, J. (2024). Actitud ambiental en estudiantes universitarios: revisión sistemática. *Revista de investigación en Ciencias Agronómicas y Veterinarias*. ALFA. Vol. 8(24). Disponible en: [2664-0902-arca-8-24-747.pdf](https://doi.org/10.2664-0902-arca-8-24-747.pdf)

Martos, L. & Medina, G. (2021). Actitudes ambientales y educación ambiental en tiempos de pandemia en estudiantes de contabilidad de una universidad privada, Chimbote 2021. *Revista Multidisciplinaria Ciencia Latina*. Vol. 6(1). Disponible en: https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v6i1.1782

Mendoza, E., Boza, J. & Escobar, H. (2019). Educación ambiental y la práctica de valores de los estudiantes universitarios. *Revista Cognosis*. Vol. IV(2). Disponible en: Vista de EDUCACIÓN AMBIENTAL Y LA PRÁCTICA DE VALORES DE LOS ESTUDIANTES UNIVERSITARIOS

Moreno, J., Rodríguez, L. & Favara, J. (2019). Conciencia ambiental en estudiantes universitarios. Un estudio de la jerarquización de los Objetivos de Desarrollo Sustentable (ODS). *Revista de Psicología*. Vol. 15(29). pp. 113-119. Disponible en: Vista de Conciencia ambiental en estudiantes universitarios. Un estudio de la jerarquización de los Objetivos de Desarrollo Sustentable (ODS)

Pérez – Franco, D., De Pro-Bueno, A. & Pérez – Manzano, A. (2018). Actitudes ambientales al final de la ESO. Un estudio diagnóstico con alumnos de Secundaria de la Región de Murcia. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*. Vol. 15(3). pp. 3501. Disponible en: 3501.pdf

Serna, C., Hernández, D., Vélez, O. & Londoño, A. (2017). Actitudes culturales hacia el desarrollo sostenible en universitarios de la ciudad de Manizales (Colombia). *Revista ESPACIOS*. Vol 38(15). pp. 20. Disponible en: a17v38n15p20.pdf

Villafuerte, H. (2020). Conocimientos, actitudes y disposición para el desarrollo sostenible en la universidad: Podcasts y concienciación ambiental. *Revista electrónica en Educación y Pedagogía*. Vol. 4(7). pp. 91-107. Disponible en: 573965471007.pdf

CAPÍTULO 3

BIOFERTILIZANTES COMO SUSTITUTO PARCIAL EN LA FERTILIZACION CONVENCIONAL DEL CULTIVO DE ARROZ EN EL CARIBE COLOMBIANO

Data de submissão: 03/06/2026

Data de aceite: 16/06/2026

Eliecer Miguel Cabrales Herrera, PhD

Docente Investigador Titular
Universidad de Córdoba
Montería, Córdoba, Colombia

Laura Sofia Osorio Barcenas

Ingeniería Agronómica
Semillero Ciencias del Suelo
Universidad de Córdoba
Montería, Córdoba, Colombia
<https://orcid.org/0009-0003-4202-2427>

RESUMEN: El uso de fertilizantes de síntesis o químicos de forma continua en la producción de arroz (*Oryza sativa* L.) ha provocado una degradación progresiva de los suelos agrícolas y una baja eficiencia en el uso de nutrientes, problemas particularmente agudos en los agroecosistemas tropicales con bajo contenido de materia orgánica. Este escenario demanda estrategias agronómicas que integren la nutrición biológica para mejorar la sostenibilidad. El presente estudio evaluó el efecto de la mezcla de tres biofertilizantes (biol, purín y microorganismos eficientes), como sustituto parcial de la fertilización química convencional (NPK) sobre el rendimiento del arroz en un suelo de Montería, Colombia. Se

implementó un diseño de bloques completos al azar con siete tratamientos (0%, 25%, 50%, 75% y 100% de NPK más 20 litros de cada biofertilizante) y tres repeticiones, además de un control con 100% de NPK sin biofertilizante y un control absoluto (sin biofertilizantes y sin fertilización convencional). Se midieron los componentes de rendimiento (densidad de población, número de panículas/m², granos por panícula, peso de 1000 granos y rendimiento final en kg/ha). Los resultados indicaron que los tratamientos que no recibieron la biofertilización, no prosperaron hasta el ciclo de producción. Entre los tratamientos que recibieron la mezcla de biofertilizantes más la dosis parcial de NPK o fertilización convencional, hubo respuesta del cultivo significativamente en el rendimiento, el cual reveló un hallazgo que osciló entre 2726,6 y 4660,2 kg/ha: el tratamiento con 25% de la dosis de NPK más el biofertilizante (T2) alcanzó un rendimiento estadísticamente similar al del tratamiento con 100% de NPK más el biofertilizante (T5). Así mismo, se encontró una correlación lineal positiva y fuerte ($R^2 = 0,8886$) entre el rendimiento y las dosis de NPK en presencia del biofertilizante. Se concluye que la aplicación de la mezcla de los biofertilizantes Biol-Purin-EM permite reducir hasta en un 75% el uso de fertilizantes sintéticos sin comprometer la productividad del cultivo. Esta tecnología representa una alternativa viable y sostenible para optimizar la nutrición del arroz, reducir los costos de

producción y mitigar el impacto ambiental asociado a la agricultura convencional en el Caribe colombiano.

PALABRAS CLAVE: agricultura sostenible; uso de biofertilizantes; producción de arroz; suelos de Montería; nutrición sostenible; rendimiento de arroz; salud del suelo.

BIOFERTILIZERS AS A PARTIAL SUBSTITUTE IN THE CONVENTIONAL FERTILIZATION OF RICE CROPS IN THE COLOMBIAN CARIBBEAN

ABSTRACT: The continuous use of synthetic or chemical fertilizers in rice (*Oryza sativa* L.) production has caused a progressive degradation of agricultural soils and a low nutrient use efficiency, problems that are particularly severe in tropical agroecosystems with low organic matter content. This scenario demands agronomic strategies that integrate biological nutrition to improve sustainability. The present study evaluated the effect of a mixture of three biofertilizers (biol, slurry, and effective microorganisms) as a partial substitute for conventional chemical fertilization (NPK) on rice yield in a soil from Montería, Colombia. A randomized complete block design was implemented with seven treatments (0%, 25%, 50%, 75%, and 100% of NPK plus 20 liters of each biofertilizer) and three replications, in addition to a control with 100% NPK without biofertilizer and an absolute control (without biofertilizers and without conventional fertilization). Physiological variables (plant height, number of leaves, and leaf area) and yield components (plant population density, number of panicles m⁻², grains per panicle, 1000-grain weight, and final yield in kg ha⁻¹) were measured. The results indicated that physiological variables showed no statistically significant differences among treatments receiving biofertilizers, regardless of the NPK dose, suggesting that biological inputs effectively compensated for the reduction of chemical inputs in maintaining plant vigor. However, yield analysis revealed a more significant finding and ranged from 2726.6 to 4660.2 kg ha⁻¹: the treatment with 25% of the NPK dose plus biofertilizer (T2) achieved a yield statistically similar to that obtained with 100% NPK plus biofertilizer (T5). Likewise, a strong positive linear correlation ($R^2 = 0.8886$) was found between yield and increasing NPK doses in the presence of the biofertilizer. It is concluded that the application of the Biol - Manure Slurry - EM biofertilizer mixture allows a reduction of up to 75% in the use of synthetic fertilizers without compromising crop productivity. This technology represents a viable and sustainable alternative to optimize rice nutrition, reduce production costs, and mitigate the environmental impact associated with conventional agriculture in the Colombian Caribbean.

KEYWORDS: sustainable agriculture; biofertilizer use; rice production; Montería soils; sustainable nutrition; rice yield; soil health.

1. INTRODUCCIÓN

La intensificación de la agricultura para satisfacer la creciente demanda alimentaria mundial ha dependido históricamente de un alto consumo de insumos sintéticos o químicos y entre ellos, los fertilizantes. Esta estrategia ha impulsado la productividad de cultivos claves como el arroz (*Oryza sativa* L.), su aplicación continua

y excesiva ha desencadenado una degradación multifactorial del recurso suelo. Este proceso deteriora la sostenibilidad de los agroecosistemas a través de múltiples mecanismos interconectados. En primer lugar, acelera la mineralización de la materia orgánica del suelo, agotando las reservas de nitrógeno nativo y comprometiendo la estructura y biología edáfica (Bijay-Singh, 2024; Pandey et al., 2023).

Este problema se agrava por la inherente ineficiencia en el uso del nitrógeno de los sistemas de arroz inundado, que típicamente se sitúa entre el 30 – 40% con prácticas convencionales (Mondal et al., 2023; He et al., 2024). Consecuentemente, una fracción mayoritaria del nitrógeno aplicado (60-70%) no es absorbida por el cultivo y se pierde en el ambiente a través de la volatilización de amoníaco, la desnitrificación y la lixiviación (Qiu et al., 2022). Esta fuga de nutrientes representa no solo una pérdida económica directa para el agricultor, sino también una fuente significativa de contaminación ambiental, contribuyendo a la eutrofización de cuerpos de agua y a la emisión de gases de efecto invernadero (Cui et al., 2020; Park et al., 2023).

El desafío es aún más crítico en los agroecosistemas tropicales, como los del Caribe colombiano, caracterizados por una baja fertilidad inherente y, de manera crucial, por un bajo contenido de materia orgánica (<2%) (Barlóg et al., 2022). La escasa materia orgánica limita drásticamente la capacidad de intercambio catiónico y la retención de agua, exacerbando las pérdidas de nutrientes y atrapando a los agricultores en un ciclo de dependencia de dosis crecientes de fertilizantes para compensar la baja eficiencia, lo que a su vez acelera la degradación del suelo.

Frente a este panorama, emerge la necesidad de validar soluciones agronómicas integradas que restauren la salud del suelo y mejoren la eficiencia de los recursos. En este sentido, los biofertilizantes, formulados a partir de recursos orgánicos locales y consorcios microbianos, representan una alternativa prometedora.

Las enmiendas orgánicas líquidas derivadas de estiércol aportan nutrientes, mejoran la estructura del suelo y estimulan la biomasa microbiana, lo que contribuye en el incremento del rendimiento del arroz entre un 5 y 22% (Iqbal et al., 2020; Gao et al., 2023). El componente de purín, en particular, dinamiza los ciclos biogeoquímicos al aumentar la abundancia de microorganismos funcionales claves (Iqbal et al., 2022; Xing et al., 2023).

El tercer pilar, los microorganismos eficientes (EM), introduce un componente biotecnológico clave. Consorcios de bacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR) que mejoran la capacidad para solubilizar fósforo inmovilizado y mejorar la absorción de nutrientes en suelos hostiles (Barbosa et al., 2024; Cozzolino et al., 2021).

Las enmiendas orgánicas actúan como un sustrato y vehículo para estos inoculantes, mientras que los microorganismos, a su vez, aceleran la descomposición de

la materia orgánica, creando un ciclo virtuoso que rompe el patrón de degradación (Zhao et al., 2021; Gui et al., 2023).

Con base en lo antes expuesto, este estudio se centra en la evaluación de una formulación integrada por tres biofertilizantes (BIOL-PURIN-EM), los cuales combinan estratégicamente enmiendas orgánicas líquidas (biol y purín) con microorganismos eficientes (EM). La evidencia científica respalda el potencial sinérgico de esta combinación.

Se trabajó con la siguiente hipótesis: la sinergia entre los componentes orgánicos y microbianos de esta mezcla de biofertilizantes puede mejorar la disponibilidad de nutrientes y la salud del suelo a tal punto que permite una reducción sustancial de la fertilización química sin afectar negativamente la productividad del cultivo.

2. MATERIALES Y METODOS

2.1. LOCALIZACIÓN

Este proyecto se realizó en la finca La Ilusión en el corregimiento de Buenos Aires Municipio de Montería, clima cálido, precipitaciones que oscilan entre 1500 a 2000 mm/año, temperatura promedio de 27,5°C, es una zona de transición de bosque húmedo y bosque seco, según escala de Holdridge (MADR, 2006). El predio es de características edáficas franco con arenas finas a muy finas (43,9% de Arena, 31,7% Limo y 24,4% arcilla) de poca oferta nutricional (Tabla 1).

Tabla 1. Características fisicoquímicas del suelo donde se hizo el ensayo.

pH	CO	MO	S	P	Ca	Mg	K	Na	Al	Cu	Fe	Zn	Mn	B
1:1	%		mg/kg		cmol(+)/kg					mg/kg				
4,62	0,70		9,6	1,2	1,01	0,47	0,12	2,24	2,24		12,9	0,56	19,7	0,14

Físicamente estos suelos de acuerdo con el triángulo textural están en el grupo de los suelos de textura franca, son suelo muy bien drenados, con abundante arena fina, los cuales en época de lluvia son poco firmes y en época seca son muy duros, dando apariencia de cementación.

Son suelos de posición fisiográfica en planicie, de topografía al igual que la vecina, casi plana cuya pendiente es menor del 2%, nivel freático profundo (más de 1 m), sin evidencia de erosión, con explotación en ganadería extensiva, aunque en la zona se puede encontrar pequeñas áreas sembradas en cultivos de plátano, yuca, ajonjolí, ñame, entre otros.

Estos suelos son profundos sin ninguna limitante física, fueron mecanizados (3 pases de rastra pesada) hace más de 10 años. El drenaje es rápido, suelos con un epipedón

ótrico sobre un cámbico de colores claros, con buena actividad de macroorganismos como Lombriz de tierra y de insectos como hormiga negra y candelilla, entre otros.

Al momento del estudio, hubo presencia de raíces vivas en los primeros 50 cm de profundidad con distribución normal, de estas el 85 – 90% estaban vivas. Es de resaltar, el lote se encontraba en potreros, los cuales no son fertilizados química ni orgánicamente. Este lote no tiene limitantes para uso y pudiera ser utilizado en cultivos como: Hortalizas, frutales, cultivos semestrales, cereales, plátano, yuca, ñame, entre otros. Para hacer de este más eficiente, una nivelación podría ayudar a distribuir mejor el agua lluvia y riego si se llegase a establecer.

2.2. TRATAMIENTOS

Se evaluaron siete (7) tratamientos en total (Tabla 2). La mezcla de los biofertilizantes en dosis de 60 l/ha (20 litros de cada uno), se hizo aspersión al suelo y foliar. Estos tratamientos llevaron dosis de fertilización química NPK de 0-25-50-75-100% de la dosis total. Como fuente de estos elementos se utilizaron los productos comerciales Urea, DAP y KCl para N, P y K, respectivamente. En virtud de que el DAP tiene N en su composición, esta se tuvo en cuenta para el cálculo de la dosis de N.

Tabla 2. Descripción de los tratamientos aplicados en el ensayo.

Tratamiento	Descripción de los tratamientos	
	Mezcla de biofertilizantes (l/ha)	Fertilizantes NPK (%)
T1	60	0
T2	60	25
T3	60	50
T4	60	75
T5	60	100
T6	0	100
T7	0	0

Los biofertilizantes utilizados (biol, Purín y Microorganismos eficientes) son de preparación local, con materiales de la zona. Las dosis usadas fueron de 20 litros de cada uno mezclados para un total de 60 l/ha. La caracterización biológica de estos biofertilizantes se hizo solamente para hongos y bacterias totales, los cuales se encontraron en poblaciones de 3×10^5 y $3,5 \times 10^9$ UFC, respectivamente.

2.3. PREPARACIÓN DE SUELOS Y SIEMBRA

Se hizo dos pases de rastra pesada y una liviana (pulida), labranza tradicional y la siembra se hizo con semilla de arroz FEDEARROZ 70 en forma manual y en hileras separadas a 25 cm entre sí, y en la hilera se establecieron 5 sitios/metro lineal, depositando de 3-5 semillas/sitio.

2.4. FERTILIZACIÓN

La fertilización química o convencional (FC) hace referencia a la aplicación de NPK cuyas dosis fueron: 150 kg de N (260 kg de urea) 80 kg de P (174 kg de DAP) y 120 kg de K (200 kg KCl), siendo esta la dosis del 100%. A partir de esta dosis se plantearon los tratamientos: 0-25-50-75-100% de la dosis. Para el caso de la biofertilización (BF), en este ensayo se usó la mezcla de microorganismos beneficiosos (2 litros), biol (2 litros) y purines (2 litros) por aspersora de 20 litros, es decir 20 litros de cada uno/ha, es decir una dosis total de 60 l/ha de la mezcla.

La fertilización química (NPK) se fraccionó en 3 momentos: 15-25-35 días después de la emergencia, aplicando el 20-30-50% de la cantidad aplicada. Para suplementar elementos menores y macronutrientes secundarios se utilizó una fuente comercial de aplicación foliar en dosis de 1 litro/ha. Mientras que aplicación de la mezcla de los biofertilizantes se hizo a los 15 y 35 días después de la emergencia.

2.5. MANEJO DE ARVENSES

Esta se realizó con Propanil en dosis de 5 L/ha, se hizo cuando el arroz tenía 25 días y se repitió a los 60 días, con un control superior al 85%.

2.6. MANEJO DE PLAGAS Y ENFERMEDADES

Se hizo manejo de plagas con Cipermetrina en dosis de 400 ml/ha para trozadores de plántulas y para control de comedores de follaje y chupadores. Para las enfermedades, no fue necesario hacer control, no se presentaron enfermedades de interés económico.

Cosecha. Se hizo en forma manual cuando el grano manifestó madurez fisiológica, para lo cual se cosechó 1 m² del centro de cada parcela o unidad experimental.

2.7. ANÁLISIS ESTADÍSTICOS

Con el programa estadístico SAS versión 9.4 se realizó el análisis de varianza (ANAVA), previa comprobación de los supuestos para dicho análisis. Se aplicó la prueba de comparación de medias de Tukey con un nivel de significancia del 95%.

2.8. VARIABLES DEL ENSAYO

Se evaluaron los componentes del rendimiento: densidad de población, número de espiguillas por panícula, número de granos por panícula (NGP), número de granos vanos (GV), número de granos llenos (GLL), porcentaje de granos vanos, peso de 1000 granos (W1000) y Rendimiento de grano (RTO), todas estas variables se hicieron al finalizar el ensayo.

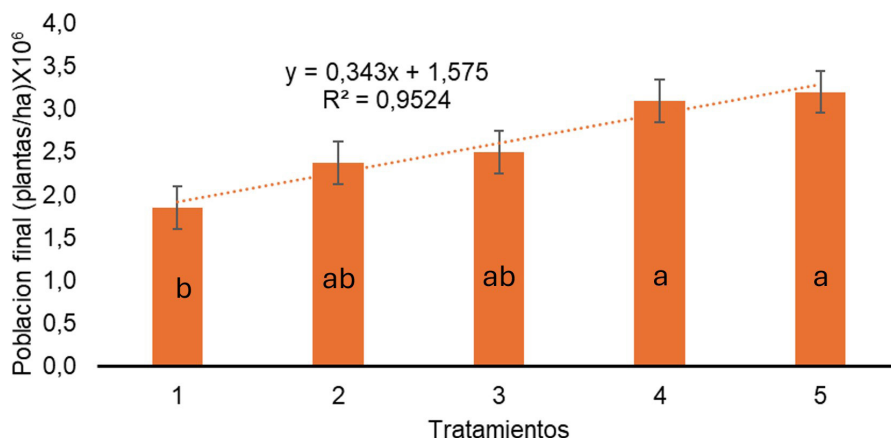
3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Para el análisis de estas variables solo se tuvo en cuenta los tratamientos que recibieron la mezcla de biofertilizantes, toda vez que los tratamientos T6 (sin FC y sin BF) y T7 (100% FC y sin BF), no prosperaron quizás por el largo periodo de sequía que se presentó desde los 70 días del cultivo, sin embargo, los tratamientos que recibieron la mezcla de biofertilizantes todos prosperaron en más del 70% en población.

3.1. DENSIDAD DE POBLACIÓN

La densidad de población presentó diferencias estadísticas significativas entre tratamientos (Figura 1), con valores entre $1,85 \times 10^6$ plantas ha^{-1} en T1 (0% FC + BF) y $3,20 \times 10^6$ plantas ha^{-1} en T5 (100% FC + BF). Se observó una tendencia creciente de la población final a medida que aumentó la dosis de fertilización convencional (FC), alcanzando los mayores valores en los tratamientos T4 y T5.

Figura 1. Densidad de población final de plantas de arroz con distintas dosis de fertilización convencional y la mezcla de biofertilizantes: microorganismos beneficiosos, bioles y purines.



La respuesta observada en la figura sugiere que a mayor aplicación de nutrientes se favorece el establecimiento y supervivencia de plantas durante el ciclo del cultivo. Asimismo, el coeficiente de determinación ($R^2 = 0,952$) indicó una fuerte asociación entre la densidad poblacional y las dosis crecientes de NPK aplicadas bajo una condición constante de biofertilización (biol+purín+EM).

Desde el punto de vista agronómico, una mayor densidad de población incrementa el potencial de producción de panículas por unidad de superficie y, por consiguiente, el rendimiento potencial del cultivo. Sin embargo, los valores obtenidos fueron inferiores a los reportados por Calero et al. (2021), quienes registraron densidades entre 3,2 y 3,5 millones de plantas ha^{-1} en arroz bajo siembra manual. Esta diferencia podría estar asociada al período de déficit hídrico registrado durante el desarrollo de nuestro ensayo, que posiblemente afectó la supervivencia de plantas y la población final del cultivo. Incluso, los tratamientos que no recibieron la mezcla de biofertilizantes no llegaron a etapa de producción.

3.2. NÚMERO DE ESPIGUILLAS POR PANÍCULA

El número de espiguillas por panícula osciló entre 11,00 y 12,33, sin presentar diferencias estadísticas significativas entre tratamientos (Tabla 3). Los mayores valores se registraron en T1 (0% FC + BF), T3 (50% FC + BF) y T5 (100% FC + BF), mientras que el menor promedio correspondió a T2 (25% FC + BF).

La ausencia de diferencias significativas y la falta de asociación entre las dosis de fertilización convencional y esta variable indican que el número de espiguillas por panícula presentó baja respuesta a los niveles de NPK evaluados bajo una misma dosis de biofertilización. Este comportamiento sugiere una mayor influencia de las características genéticas del cultivar sobre este componente del rendimiento. Estudios recientes indican que el número de espiguillas por panícula es un carácter cuantitativo altamente heredable y controlado por múltiples genes relacionados con el desarrollo de la panícula y la diferenciación de espiguillas, lo cual bajo las condiciones del ensayo no hubo respuesta para su variabilidad (Lu et al., 2022).

Los valores obtenidos fueron consistentes con los reportados en otros estudios de arroz bajo diferentes condiciones de manejo nutricional, lo que refuerza la estabilidad de esta variable frente a cambios moderados en los planes de fertilización (Hernández et al., 2021).

3.3. GRANOS POR PANÍCULA

El número total de granos por panícula varió entre 93,33 (T1 = 0% FC + BF) y 150,67 (T3 = 50% FC + BF) granos. Sin embargo, no se presentaron diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos evaluados (Tabla 3), lo que indica que las dosis de fertilización convencional evaluadas, bajo una condición constante de biofertilización, no modificaron significativamente esta variable.

Aunque se observó una diferencia numérica importante entre los tratamientos extremos, el elevado coeficiente de variación (24,37%) sugiere una alta variabilidad entre unidades experimentales, lo que pudo limitar la detección de diferencias estadísticas. De igual forma, no se encontró una relación consistente entre las dosis crecientes de NPK y el número de granos por panícula.

Estos resultados sugieren que este componente del rendimiento presentó una baja respuesta a los tratamientos de fertilización evaluados. Diversos estudios han señalado que el número de granos por panícula depende de la interacción entre factores genéticos y ambientales, siendo influenciado por las condiciones de crecimiento durante la diferenciación y desarrollo de la panícula (Yoshida, 1981; Lu et al., 2022). En el presente estudio, la ausencia de respuesta significativa indica que los diferentes niveles de fertilización no alteraron sustancialmente el potencial de formación de granos por panícula del cultivar evaluado en las condiciones edafoclimáticas del Caribe colombiano.

Tabla 3. Promedio de número de espiguillas/panícula, número de granos/panículas, número de granos llenos y vanos, porcentaje de granos vanos en función de la dosis de fertilización convencional más mezcla de biofertilizantes en el Caribe colombiano.

TTO	NESPT	Número de granos			G. Vanos (%)	W1000G
		Panícula	Llenos	Vanos		
1	12,33 a	93,33 a	59,00 a	34,33 a	50,97 a	25,4 a
2	11,00 a	106,33 a	81,67 a	24,66 a	25,00 a	22,58 a
3	12,33 a	150,67 a	118,67 a	32,00 a	23,00 a	23,62 a
4	11,66 a	104,33 a	88,67 a	15,66 a	15,13 a	24,61 a
5	12,33 a	122,00 a	73,33 a	48,66 a	42,95 a	23,19 a
CV (%)	15,26 a	24,37	36,21	38,03	59,87	8,24

3.4. NÚMERO DE GRANOS LLENOS Y VANOS

El número de granos llenos por panícula osciló entre 59,00 y 118,67 granos, correspondiendo el menor valor al tratamiento T1 (0% FC + BF) y el mayor a T3 (50% FC + BF). Sin embargo, no se presentaron diferencias estadísticas significativas

entre los tratamientos evaluados (Tabla 3), lo que indica que las dosis de fertilización convencional evaluadas, bajo una condición constante de biofertilización, no modificaron significativamente esta variable. El elevado coeficiente de variación ($CV = 36,21\%$) sugiere una alta variabilidad experimental, lo que pudo apocar la presencia de diferencias estadísticas entre tratamientos.

Por su parte, el número de granos vanos varió entre 15,66 y 48,66 granos por panícula, registrándose el menor valor en T4 (75% FC + BF) y el mayor en T5 (100% FC + BF), sin diferencias estadísticas significativas (Tabla 3). De igual forma, el porcentaje de granos vanos osciló entre 15,13 y 50,97%, mostrando una amplia variación numérica entre tratamientos, aunque sin respuesta estadística al incremento de las dosis de NPK aplicados en los tratamientos.

Los altos porcentajes de granos vanos observados en el ensayo podrían estar asociados al déficit hídrico registrado durante la fase reproductiva y de llenado de grano. Diversos estudios han demostrado que el estrés por sequía durante estas etapas reduce el llenado de granos, incrementa la esterilidad de espiguillas y disminuye el rendimiento final del cultivo de arroz (Hassan et al., 2023; Panja et al., 2024). En consecuencia, las condiciones ambientales posiblemente tuvieron una mayor influencia sobre estas variables que los diferentes planes de fertilización evaluados en dicho ensayo.

3.5. PESO DE 1000 GRANOS (W1000G)

Esta variable osciló entre 22,58 y 25,40 g, sin presentar diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos (Tabla 3). El menor valor se registró en T2 (25% FC + BF) y el mayor en T1 (0% FC + BF), evidenciando una baja variabilidad de esta característica entre los diferentes niveles de fertilización evaluados.

La ausencia de diferencias significativas indica que las dosis de fertilización convencional (FC) aplicadas bajo una condición constante de biofertilización (BF) no modificaron el peso individual de los granos. Este comportamiento sugiere que el peso del grano estuvo determinado principalmente por las características genéticas del cultivar y, en menor medida, por los tratamientos nutricionales evaluados. Diversos estudios han señalado que este componente del rendimiento presenta una alta heredabilidad y una menor sensibilidad a cambios en el manejo agronómico en comparación con otros componentes del rendimiento, como el número de panículas o el número de granos por panícula (Li et al., 2018; Zuo y Li, 2014).

Los valores obtenidos se encuentran dentro del rango reportado para cultivares comerciales de arroz y fueron similares a los observados en otros estudios realizados

bajo diferentes condiciones de fertilización, lo que confirma la estabilidad de esta variable frente a variaciones moderadas en el suministro de nutrientes (Zuo & Li, 2014).

3.6. RENDIMIENTO DE GRANO

Esta variable presentó diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos, con valores comprendidos entre 2726,6 y 4660,2 kg ha⁻¹. El menor rendimiento se obtuvo en T1 (0% FC + BF), mientras que el mayor correspondió a T5 (100% FC + BF). Sin embargo, los tratamientos T2 (25% FC + BF), T3 (50% FC + BF), T4 (75% FC + BF) y T5 (100% FC + BF) conformaron un mismo grupo estadístico, lo que indica que reducciones de hasta el 75% de la dosis de fertilización convencional no afectaron significativamente el rendimiento cuando se mantuvo la aplicación de biofertilizantes (Figura2).

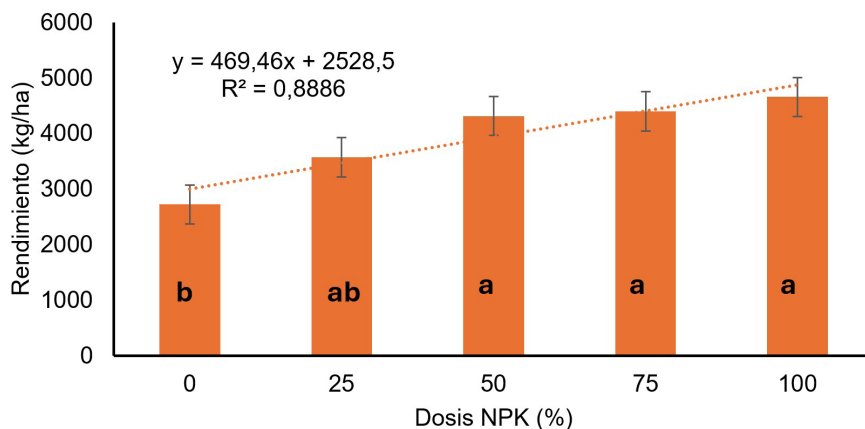
Este resultado reviste gran importancia desde el punto de vista agronómico y económico, ya que sugiere que la combinación de biofertilizantes con dosis reducidas de fertilización mineral permitió mantener rendimientos comparables a los obtenidos con la dosis completa de NPK. Particularmente, los tratamientos T2 y T3 alcanzaron rendimientos equivalentes al tratamiento con fertilización convencional plena, lo que evidencia una mayor eficiencia en el uso de los nutrientes aplicados. Diversos estudios han reportado que los biofertilizantes favorecen la disponibilidad y absorción de nutrientes mediante la estimulación de la actividad microbiana del suelo, el incremento del crecimiento de las raíces y la solubilización de nutrientes, contribuyendo a mejorar la eficiencia agronómica de los fertilizantes minerales (Backer et al., 2018; Chandini et al., 2019).

La respuesta del rendimiento a las dosis crecientes de NPK siguió una tendencia positiva, descrita por el modelo $Y = 2528,5 + 469,46X$, con un coeficiente de determinación ($R^2 = 0,886$), indicando que el 88,6% de la variación observada en el rendimiento estuvo asociada a los niveles de fertilización evaluados. No obstante, el porcentaje restante podría atribuirse a otros factores que influyen sobre la productividad del cultivo, tales como las condiciones climáticas, las propiedades del suelo, la disponibilidad hídrica y el manejo agronómico.

Los mayores rendimientos obtenidos en T4 y T5 fueron cercanos al rendimiento promedio mundial de arroz reportado por FAOSTAT para 2022, estimado en aproximadamente 4,5 t ha⁻¹. Este resultado adquiere especial relevancia considerando que el ensayo estuvo sometido a períodos de déficit hídrico durante parte del ciclo del cultivo, condición que pudo limitar la expresión del potencial productivo. En este contexto, la capacidad de los tratamientos con biofertilización y dosis intermedias de NPK para

mantener rendimientos competitivos constituye una alternativa promisorio para reducir costos de producción y disminuir la dependencia de fertilizantes de síntesis, contribuyendo a una agricultura más eficiente y ambientalmente sostenible.

Figura 2. Rendimiento del cultivo de arroz con distintas dosis de fertilización convencional y la mezcla de biofertilizantes: microorganismos beneficiosos, bioles y purines.



4. ANÁLISIS DE COSTOS

La sostenibilidad económica de un sistema productivo agrícola depende de la optimización de los costos de producción en relación con los ingresos generados. En este ensayo donde se evaluó el comportamiento financiero de siete tratamientos (T1 a T7) que varían en sus niveles de fertilización sintética o convencional (NPK) y la inclusión de una mezcla de biofertilizantes (BF). En este análisis se buscaba el punto de equilibrio donde la inversión en insumos maximiza la utilidad Bruta, permitiendo al productor tomar decisiones basadas en evidencia científica y financiera.

El análisis de costos mostró una progresión lineal esperada en los tratamientos que incluyen biofertilizantes (T1 a T5): T1 (0% FC + BF): Presenta un costo base de \$3.948.990 y fue el tratamiento con el de menor costo de producción, mientras que el tratamiento T5 (100% FC + BF) fue el de mayor valor con \$6.987.030 (Tabla 4).

Un hallazgo crítico se observa al comparar el T5 con el T6 (100% FC - BF), la eliminación del componente biológico reduce el costo total en aproximadamente un 11,15% (de 6.987.030 a 6.208.000). Sin embargo, como veremos más adelante, este ahorro en costos se traduce en un desastre financiero debido a la ausencia total de ingresos registrados en el T6 durante este ciclo evaluativo: las plantas no llegaron a producción, producto quizás de una prolongada sequía que se presentó en la zona.

El análisis del efecto de la Biofertilización (BF) muestra la diferencia entre el T1 (Ingresos: 4.231.683,2) y los tratamientos con mayor carga de NPK (FC) sugiere que el biofertilizante (BF) por sí solo logra establecer una base de producción. No obstante, es la interacción con el NPK lo que potencia el resultado. El salto más significativo en ingresos ocurre entre el T2 (\$5.550.883,2) y el T3 (\$6.699.673,6), donde un incremento del 25% en la dosis de NPK genera un aumento sustancial en el flujo de caja.

Tabla 4. Análisis de costo del ensayo.

Detalle	Unidad	Costo	0%	25%	50%	75%	100%	100% FC-	0% FC-BF
			FC+BF	FC+BF	FC+BF	FC+BF	FC+BF	BF	FC-BF
Tratamiento			T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
Arriendo	Ha	700.000	700.000	700.000	700.000	700.000	700.000	700.000	700.000
Adecuación del lote	Ha	300.000	300.000	300.000	300.000	300.000	300.000	300.000	300.000
Herbicidas antes del cultivo+ aplicación	Ha	150.000	150.000	150.000	150.000	150.000	150.000	150.000	150.000
Semilla	kg	350.000	350.000	350.000	350.000	350.000	350.000	350.000	350.000
Siembra	Jornal	1.200.000	1.200.000	1.200.000	1.200.000	1.200.000	1.200.000	1.200.000	1.200.000
Urea+ aplicación	Bulto	988.000	-	247.000	494.000	741.000	988.000	988.000	-
KCl+ aplicación	Bulto	920.000	-	230.000	460.000	690.000	920.000	920.000	-
DAP +aplicación	Bulto	840.000	-	210.000	420.000	630.000	840.000	840.000	-
Mezcla biofertilizantes +aplicación	Ha	80.000	80.000	80.000	80.000	80.000	80.000	-	-
Control insectos	ha	160.000	160.000	160.000	160.000	160.000	160.000	160.000	160.000
Manejo malezas+ aplicación	ha	300.000	300.000	300.000	300.000	300.000	300.000	300.000	300.000
Riego	Ha	300.000	300.000	300.000	300.000	300.000	300.000	300.000	300.000
Recolección			408.990	536.490	647.520	660.600	699.030	-	-
total costos de producción	Ha		3.948.990	4.763.490	5.561.520	6.261.600	6.987.030	6.208.000	3.460.000
Rendimiento			2.727	3.577	4.317	4.404	4.660	-	-
Ingresos			4.231.683	5.550.883	6.699.674	6.835.008	7.232.630	-	-
Utilidad Bruta			282.693	787.393	1.138.154	573.408	245.600	-6.208.000	-3.460.000

Se infiere que la utilidad bruta es el indicador más sincero de este estudio. A pesar de que el T5 genera el mayor ingreso bruto (\$7.232.630,4), no es el tratamiento

más rentable. Sin embargo, el Tratamiento 3 (50% FC + BF) se posiciona como el “punto óptimo” económico. Con una utilidad de \$1.138.153,6, supera con creces a todos los demás escenarios.

Este análisis sugiere que, después del 50% de aplicación de NPK en presencia de biofertilizantes, el sistema entra en una zona de rendimientos decrecientes o ineficiencia fisiológica que no justifica el gasto adicional en insumos químicos.

Para el caso de los tratamientos T6 (100% FC - BF) y T7 (Control negativo: 0% FC - BF) arrojan resultados críticos con utilidades negativas de -\$6.208.000 y -\$3.460.000 respectivamente, esto indica que, bajo las condiciones del estudio, la ausencia de biofertilizantes en dosis altas de NPK (T6) o la ausencia total de nutrición (T7) resultan en una pérdida total de la producción comercializable (Ingresos nulos).

5. CONCLUSIONES

La aplicación de la mezcla de biofertilizantes (BIOL-PURIN-EM) demostró ser una estrategia altamente eficaz para reducir la dependencia de fertilizantes químicos en el cultivo de arroz. El hallazgo principal de este estudio es que la aplicación de solo el 25% de la dosis convencional de NPK, en combinación con la mezcla de biofertilizantes, logró un rendimiento final estadísticamente equivalente al obtenido con las dosis mayores e incluso la del 100% de NPK más la mezcla de biofertilizantes.

Existe un claro efecto sinérgico entre la fertilización química y la mezcla de los biofertilizantes. El rendimiento del cultivo mostró una fuerte correlación lineal positiva ($R^2 > 0.88$) con el aumento de la dosis de NPK en presencia de los aportes biológicos, sugiriendo que el biofertilizante no solo aporta nutrientes, sino que también optimiza la eficiencia de uso de los fertilizantes sintéticos aplicados.

REFERENCIAS

Backer, R., Rokem, J. S., Llangumaran, G., Lamont, J., Praslickova, D., Ricci, E., Subramanian, S., & Smith, D. L. (2018). Plant growth-promoting rhizobacteria: Context, mechanisms of action, and roadmap to commercialization of biostimulants for sustainable agriculture. *Frontiers in Plant Science*, 9, 1473. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01473>

Barbosa, A., Reyes, I., Valery, A., Labrador, C. C., Martínez, O., & Alonso, M. F. (2024). The use of phosphate rock and plant growth promoting microorganisms for the management of *Urochloa decumbens* (Stapf.) R.D. Webster in acidic soils. *PeerJ*, 12, e18610. <https://doi.org/10.7717/peerj.18610>

Bartóg, P., Grzebisz, W., & Łukowiak, R. (2022). Fertilizers and Fertilization Strategies Mitigating Soil Factors Constraining Efficiency of Nitrogen in Plant Production. *Plants*, 11(14), Article 14. <https://doi.org/10.3390/plants11141855>

- Bijay-singh. (2024). Long-term fertilizer nitrogen management – Soil health conundrum. *Pedosphere*, 34(1), 23-25. <https://doi.org/10.1016/j.pedsph.2023.09.013>
- Calero, A., Pérez, Y., Gómez, M., & Hernández, J. (2021). Densidad de población y rendimiento del cultivo de arroz bajo condiciones de producción en Cuba. *Cultivos Tropicales*, 42(3), 45–53.
- Chandini, Kumar, R., & Prakash, O. (2019). The impact of chemical fertilizers on our environment and ecosystem. En *Research Trends in Environmental Sciences*. <https://doi.org/10.22271/ed.book.593>
- Cozzolino, V., Monda, H., Savy, D., Di Meo, V., Vinci, G., & Smalla, K. (2021). Cooperation among phosphate-solubilizing bacteria, humic acids and arbuscular mycorrhizal fungi induces soil microbiome shifts and enhances plant nutrient uptake. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 8(1), 31. <https://doi.org/10.1186/s40538-021-00230-x>
- Cui, N., Cai, M., Zhang, X., Abdelhafez, A. A., Zhou, L., Sun, H., Chen, G., Zou, G., & Zhou, S. (2020). Runoff loss of nitrogen and phosphorus from a rice paddy field in the east of China: Effects of long-term chemical N fertilizer and organic manure applications. *Global Ecology and Conservation*, 22, e01011. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e01011>
- Gao, P., Zhang, T., Lei, X., Cui, X., Lu, Y., Fan, P., Long, S., Huang, J., Gao, J., Zhang, Z., & Zhang, H. (2023). Improvement of soil fertility and rice yield after long-term application of cow manure combined with inorganic fertilizers. *Journal of Integrative Agriculture*, 22(7), 2221-2232. <https://doi.org/10.1016/j.jia.2023.02.037>
- Gui, Y., Gu, C., Xiao, X., Gao, Y., & Zhao, Y. (2023). Microbial Inoculations Promoted the Rice Plant Growth by Regulating the Root-Zone Bacterial Community Composition and Potential Function. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 23(4), 5222-5232. <https://doi.org/10.1007/s42729-023-01394-1>
- Hassan, M. A., Dahu, N., Hongning, T., Qian, Z., Yueming, Y., Yiru, L., & Shimei, W. (2023). Drought stress in rice: Morpho-physiological and molecular responses and marker-assisted breeding. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1215371. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1215371>
- He, S., Zhang, Y., Yang, X., Li, Q., Li, C., & Yao, T. (2024). Effects of Microbial Inoculants Combined with Chemical Fertilizer on Growth and Soil Nutrient Dynamics of Timothy (*Phleum pratense* L.). *Agronomy*, 14(5), Article 5. <https://doi.org/10.3390/agronomy14051016>
- He, X., Zhu, H., Shi, A., & Wang, X. (2024). Optimizing Nitrogen Fertilizer Management Enhances Rice Yield, Dry Matter, and Nitrogen Use Efficiency. *Agronomy*, 14(5), Article 5. <https://doi.org/10.3390/agronomy14050919>
- Hernández Quiñónez, J, Salazar mercado, s y Rodriguez Araujo, E. (2021). Efecto de los elementos menores en la calidad molinera del arroz (*Oryza sativa* L.) variedad F2000. Mutis. <http://repositorio.ufps.edu.co/handle/ufps/904>.
- Iqbal, A., Ali, I., Yuan, P., Khan, R., Liang, H., Wei, S., & Jiang, L. (2022). Combined Application of Manure and Chemical Fertilizers Alters Soil Environmental Variables and Improves Soil Fungal Community Composition and Rice Grain Yield. *Frontiers in Microbiology*, 13. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.856355>
- Iqbal, A., He, L., Ali, I., Ullah, S., Khan, A., Khan, A., Akhtar, K., Wei, S., Zhao, Q., Zhang, J., & Jiang, L. (2020). Manure combined with chemical fertilizer increases rice productivity by improving soil health, post-anthesis biomass yield, and nitrogen metabolism. *PLOS ONE*, 15(10), e0238934. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0238934>

- Li, N., Xu, R., & Li, Y. (2018). Molecular networks of seed size control in plants. *Annual Review of Plant Biology*, 69, 435–463. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042817-040247>
- Lu, Y., Chuan, M., Wang, H., Chen, R., Tao, T., Zhou, Y., Xu, Y., Li, P., Yao, Y., Xu, C., & Yang, Z. (2022). Genetic and molecular factors in determining grain number per panicle of rice. *Frontiers in Plant Science*, 13, 964246. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.964246>
- Mondal, S., Kumar, R., Mishra, J. S., Dass, A., Kumar, S., Vijay, K. V., Kumari, M., Khan, S. R., & Singh, V. K. (2023). Grain nitrogen content and productivity of rice and maize under variable doses of fertilizer nitrogen. *Heliyon*, 9(6). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e17321>
- Pandey, A., Eldridge, S. M., Weatherley, A., Willett, I. R., Myint, A. K., Oo, A. N., Ngwe, K., Mang, Z. T., & Chen, D. (2023). High fertilizer nitrogen input increases nitrogen mining in sandy paddy soils. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 125(1), 77–88. <https://doi.org/10.1007/s10705-022-10257-7>
- Panja, S., Gupta, A. D., & Dey, N. (2024). Impact of drought stress on grains filling in rice and its management: A review. *Agricultural Reviews*, 45(2), 282–289. <https://doi.org/10.18805/ag.R-2369>
- Park, J.-R., Jang, Y.-H., Kim, E.-G., Lee, G.-S., & Kim, K.-M. (2023). Nitrogen Fertilization Causes Changes in Agricultural Characteristics and Gas Emissions in Rice Field. *Sustainability*, 15(4), Article 4. <https://doi.org/10.3390/su15043336>
- Qiu, H., Yang, S., Jiang, Z., Xu, Y., & Jiao, X. (2022). Effect of Irrigation and Fertilizer Management on Rice Yield and Nitrogen Loss: A Meta-Analysis. *Plants*, 11(13), Article 13. <https://doi.org/10.3390/plants11131690>
- Xing, Y., Wang, C., Li, Z., Chen, J., & Li, Y. (2023). Effect and Mechanism of Rice-Pasture Rotation Systems on Yield Increase and Runoff Reduction under Different Fertilizer Treatments. *Agronomy*, 13(3), Article 3. <https://doi.org/10.3390/agronomy13030866>
- Yoshida, S. (1981). *Fundamentals of rice crop science*. International Rice Research Institute (IRRI).
- Zhao, Y., Sun, Y., Pei, M., Fu, J., Ji, H., Zhao, L., & Xiao, X. (2021). Enhanced rice yields are related to pronounced shifts in soil resident bacterial community structures in response to *Rhodospseudomonas palustris* and *Bacillus subtilis* inoculation. *Journal of Soils and Sediments*, 21(6), 2369–2380. <https://doi.org/10.1007/s11368-021-02929-8>
- Zuo, J., & Li, J. (2014). Molecular genetic dissection of quantitative trait loci regulating rice grain size. *Annual Review of Genetics*, 48, 99–118. <https://doi.org/10.1146/annurev-genet-120213-092138e>

CAPÍTULO 4

APLICACIONES DE ENMIENDAS ORGÁNICAS E INORGÁNICAS EN GRANADO (*Punica granatum* L.) 'WONDERFUL': CONCENTRACIÓN DE NUTRIENTES EN HOJA

Data de submissão: 02/06/2026

Data de aceite: 17/06/2026

Rosa María Yáñez Muñoz

Doctorado en Ciencias en Manejo Sustentable de los Recursos Naturales en Zona Áridas y Semiáridas
Facultad de Ciencias Agrotecnológicas
Universidad Autónoma de Chihuahua
Chihuahua. Chih., México
<https://orcid.org/0000-0001-5571-0139>

Juan Manuel Soto Parra

D. Ph. Doctorado en Ciencias en Recursos Naturales
Facultad de Ciencias Agrotecnológicas
Universidad Autónoma de Chihuahua
Chihuahua. Chih., México
<https://orcid.org/0000-0003-3867-9904>

Esteban Sánchez Chávez

Doctorado en Ciencias Fisiología Vegetal
Investigador Titular
Centro de Investigación en Alimentos y Desarrollo (CIAD)
Delicias, Chihuahua, México
<https://orcid.org/0000-0002-6845-4290>

Ana Lilia Santana Díaz

Maestría en Ciencias de la Productividad Frutícola
Facultad de Ciencias Agrotecnológicas
Universidad Autónoma de Chihuahua
Chihuahua, Chih., México
<https://orcid.org/0009-0003-4911-6362>

Laura Raquel Orozco Meléndez

Doctorado en Ciencias Hortofrutícola
Facultad de Ciencias Agrotecnológicas
Universidad Autónoma de Chihuahua
Chihuahua. Chih., México
<https://orcid.org/0000-0002-4328-271X>

Ramona Pérez Leal

Doctorado en Ciencias en Horticultura
Facultad de Ciencias Agrotecnológicas
Universidad Autónoma de Chihuahua
Chihuahua. Chih., México
<https://orcid.org/0000-0001-7554-1571>

Nubia Guadalupe Torres Beltrán

Doctorado en Ciencias Hortofrutícola
Facultad de Ciencias Agrotecnológicas
Universidad Autónoma de Chihuahua
Chihuahua. Chih., México
<https://orcid.org/0009-0006-3943-3219>

Julio César Oviedo Mireles

Doctorado en Ciencias Hortofrutícola
Facultad de Ciencias Agrotecnológicas
Universidad Autónoma de Chihuahua
Chihuahua. Chih., México
<https://orcid.org/0000-0001-9798-8067>

RESUMEN: El cultivo del granado (*Punica granatum* L.) se caracteriza como un árbol de porte pequeño, que ha tomado gran relevancia en los últimos años, por ser considerado un alimento funcional, debido a sus propiedades, ya que su fruto se caracteriza por ser rico en antioxidantes, minerales y vitaminas. Además,

el cultivo representa una alternativa en condiciones marginales y con baja oferta, también presenta una alta variabilidad, resultando útil para realizar estudios nutricionales. Por su parte, las aplicaciones de fertilizantes orgánicos pueden mejorar las propiedades físicas, la actividad biológica, la fertilidad de los suelos y la nutrición de los cultivos, aunque la disponibilidad de nutrientes es más lenta. El estudio se llevó a cabo durante el ciclo 2017, en el municipio de Coyame, Chihuahua, México, en árboles de granado 'Wonderful', con una distancia de plantación de 5.0 x 2.5 m (800 árboles por hectárea), Las fuentes empleadas fueron Humus de lombriz sólido y líquido, Sulfato de Potasio K_2SO_4 (51% K_2O , S 18%), Sulfato de Calcio $CaSO_4$ (31.31% Ca, S 17%), AlgaEnzims (Bioestimulante orgánico) y Micorrizas, el diseño experimental consistió en una estructura Taguchi L25 para 6 factores y 5 niveles para cada factor con los que se formaron 25 tratamientos con tres repeticiones, cada repetición consistió de un árbol, observándose que la fertilización con humus sólido, humus líquido y AlgaEnzims complementada con $CaSO_4$ se considera una buena estrategia de fertilización en granado para sentar las bases para una producción sostenible y presente beneficios al medio ambiente.

PALABRAS CLAVES: nutrientes; humus sólido y líquido; sulfato de calcio; sulfato de potasio y bioestimulante.

1. INTRODUCCIÓN

Rajaei & Yazdanpanah (2015) caracterizan al granado (*Punica granatum* L.) como un árbol de porte pequeño perteneciente a la familia Lythraceae, que ha tomado gran relevancia en los últimos años, por ser considerado un alimento funcional, debido a sus propiedades, ya que su fruto se caracteriza por ser rico en antioxidantes, minerales y vitaminas. Además, el cultivo representa una alternativa en condiciones marginales y con baja oferta hídrica (Carpio, 2013). Según Martínez et al. (2004) el granado presenta alta variabilidad, resultando útil para realizar estudios nutricionales.

La producción mundial actual de granada no se conoce con precisión, pero previamente se ha estimado en aproximadamente 3 millones t año⁻¹ con 300,000 ha en producción (Hernández, *et al.*, 2012); el valor total del cultivo se desconoce. El cultivo de la granada variedad 'Wonderful' se produce en muchas regiones y es el estándar de la industria para Estados Unidos e Israel (Holanda y Bar-Ya'akov, 2008). 'Wonderful' es una planta vigorosa con la capacidad de producir grandes rendimientos (Levin, 2006) con fruta grande con un exocarpio y jugo rojo oscuro que sus parámetros se ajustan al mercado para ser comercializados en fresco y jugo concentrado (Stover y Mercure, 2007).

Los nutrientes minerales, tienen funciones esenciales y específicas en el metabolismo de las plantas como activadores de reacciones enzimáticas, osmorreguladores y constituyentes de estructuras orgánicas (Latsague, *et al.*, 2014). Aunque la fertilización mineral en el suelo es la estrategia más utilizada para mejorar la producción y la calidad de los cultivos, este tipo de fertilización a largo plazo no será el

más efectivo para mantener la fertilidad y el equilibrio del suelo (Cucci, *et al.* 2019). Por su parte, las aplicaciones de fertilizantes orgánicos pueden mejorar las propiedades físicas, la actividad biológica, la fertilidad de los suelos y la nutrición de los cultivos, aunque la disponibilidad de nutrientes es más lenta (Zaragoza, *et al.* 2011; Márquez, *et al.* 2010; Bastida, *et al.* 2017). A su vez la aplicación de hongos micorrízicos ayuda a mejorar la absorción de nutrientes (Tarango, *et al.*, 2009).

Tanto los métodos de fertilización mineral como los orgánicos se caracterizan por sus ventajas y desventajas, en las que se ha mantenido un animado debate durante mucho tiempo. Actualmente, se prefiere la fertilización orgánica con bajo aporte químico (Cucci, *et al.*, 2019).

La mayoría de los productores de granada aplican fertilizantes inorgánicos al voleo (Glozer y Ferguson, 2008) o fertirrigación (Blumenfeld, *et al.*, 2000). Aunque en los árboles frutales hace un uso generalizado de las aplicaciones de nutrientes foliares para corregir las deficiencias de los mismos, aumentar el rendimiento y corregir o prevenir desordenes fisiológicos, hay poca evidencia publicada de productores de granada que utilicen aplicaciones foliares de nutrientes, excepto las aplicaciones de $ZnSO_4$ para corregir deficiencias de Zn (Glozer y Ferguson, 2008; Stover y Mercure, 2007).

Sin embargo, estudios sobre el manejo nutricional del granado con fertilizantes orgánicos e inorgánicos son muy limitados a nivel mundial. Por lo tanto, el objetivo de este estudio fue determinar el efecto de la adición de la materia orgánica y fertilizantes inorgánicos sobre el estado nutricional del granado, con el propósito de sentar las bases para una producción y rendimiento sostenido.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. ÁREA EXPERIMENTAL Y TRATAMIENTOS

El estudio se llevó a cabo durante el ciclo 2017, en el municipio de Coyame, Chihuahua, México, en árboles de granado 'Wonderful', plantados en 2016, con una distancia de plantación de 5.0 x 2.5 m (800 árboles por hectárea). El clima de la región es desértico, árido y extremo; con una temperatura máxima de 43°C y una mínima de -15°C. La precipitación pluvial media anual es de 307.3 milímetros, con una humedad relativa de 45% y un promedio de 45 días de lluvia, ubicado a una latitud norte 29°28'™, longitud oeste 105°06'™; con una altitud de 1,220 metros sobre el nivel del mar. Colinda al norte con Guadalupe, al este con Ojinaga, al sur con Aldama y Ojinaga y al oeste con Aldama y Ahumada. El municipio tiene una distancia aproximada a la capital del estado de 143 kilómetros (INIFAP, 2018). El tipo de suelo que predomina es el Calcisol, las

propiedades físico-químicas fueron las siguientes: pH 7.71, conductividad eléctrica (C.E) 1.70 dS m⁻¹, contenido de materia orgánica (M.O.) 0.85%, para los macronutrientes los valores fueron: Nitrógeno (N) 112.50 kg ha⁻¹, Fósforo (P) 3.00 mg kg⁻¹, Potasio (K) 362.5 mg kg⁻¹, Calcio (Ca) 5312.5 mg kg⁻¹, Magnesio (Mg) 275.0 mg kg⁻¹, y para micronutrientes fueron: Hierro (Fe) 2.32 mg kg⁻¹, Manganeso (Mn) 1.60 mg kg⁻¹, Cobre (Cu) 0.20 mg kg⁻¹.

Las fuentes empleadas fueron: Humus de lombriz sólido, OptiHumus^{MR}, (pH 8.12, C.E. 10.18 ds m⁻¹, Relación C/N 6.57, composición en porcentajes: M.O. 21.70, C 12.59, N 1.91, P 0.96, K 1.68, Ca 3.52, Mg 1.35, Na 0.27; en mg kg⁻¹: Fe 11850.29, Mn 458.80, Zn 173.65, Cu 34.04, B 164.74.); Humus líquido de lombriz, (pH 8.20, C.E. 4.06 ds m⁻¹, Relación C/N 3.13, composición en porcentajes: M.O. 0.11, C 0.06, N 0.02, P 0.13, K 0.13, Ca 0.01, Mg 0.004, Sodio (Na) 0.02; en mg kg⁻¹: Hierro (Fe) 3.70, Manganeso (Mn) 1.10, Zinc (Zn) 0.11, Cobre (Cu) 0.60, Boro (B) 7.33); Potasio (K) (K₂SO₄ Sulfato de Potasio SOP51 Ultrasol SQM, 51.0% K₂O, S 18.0%, pH en Solución al 10% 5.0, Solubilidad a 20 °C 11,14 g/100ml; Calcio (Ca) (sulfato de calcio Solugyp^{MR}, 31.31% CaO, 17.0% S), AlgaEnzims (Potenciador orgánico de uso foliar y al suelo, extracto de algas marinas Palau Bloquim, composición en porcentajes: Acondicionadores inherentes a las algas marinas, 93.84; Materia Orgánica (Material Algáceo) 4.15; Proteína 1.14; fibra cruda 0.43; Cenizas 0.28; Azúcares 0.13%; grasas 0.03; Nitrógeno (N) 1.45, Fósforo (P) 0.075, Potasio (K) 1.48, Calcio (Ca) 0.062, Magnesio (Mg) 0.132, Sodio (Na) 1.36; Hierro (Fe) 0.44, Manganeso (Mn) 0.0072, Zinc (Zn) 0.505, Cobre (Cu) 0.0147, Silicio (Si) 0.0004; Micorrizas (Sehumic-Vam^{MR}, *Acualospora scobiculata*, *Gigaspora margarita*, *Glomus fasciculatum*, *G. constrictum*, *G. tortuosum*, *G. geosporum* con 20,000 esporas viables Kg⁻¹). La evaluación de la investigación se realizó en base a los parámetros del contenido nutricional foliar macro y micronutrientes.

2.2. CONTENIDO NUTRICIONAL FOLIAR

La concentración de nitrógeno total (Nt) se cuantificó por el método micro-kjeldhal (Bremner y Mulvaney, 1982). El N-NO₃⁻¹ por el método de Brucina y espectrofotometría UV-visible (APHA, 1992), Para los iones de K, Ca, Mg, Na, Cu, Fe, Mn y Zn la muestra se sometió a digestión ácida (Cottenie, 1994) y sus concentraciones fueron obtenidas por espectrofotometría de absorción atómica, utilizando un equipo Perkin Elmer (modelo AAnalyst 100). Para la determinación de P, las muestras se sometieron a digestión ácida (Cottenie, 1994) y recuperación con vanadato-molibdeno de amonio y sus concentraciones se obtuvieron en un espectrofotómetro ultravioleta visible en un equipo modelo Spectronic® Genesys 5. Para la determinación de NO₃⁻, las muestras se sometieron a sequedad y posteriormente se recupera con brucina al

4% (Romiti. N. A. 1951) y sus concentraciones se obtuvieron en un espectrofotómetro ultravioleta visible en un equipo modelo Spectronic® Genesis 5.

2.3. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Se utilizó una estructura Taguchi L25 para 6 factores y 5 niveles para cada factor (Tabla 1) con los que se formaron 25 tratamientos con tres repeticiones, cada repetición consistió de un árbol (Tabla 2).

Tabla 1. Factores y niveles de aplicación estructura Taguchi L25, fertilización orgánica, mineral y micorrizas en granado 2017. Coyame, Chih.

Taguchi L25, 6 repeticiones						
Factores / Niveles						
Concentración X	kg ha ⁻¹				L	
	HUM_LOMB	LIX_LOMB	CaSO ₄	K ₂ SO ₄	Algas_M	Micorrizas
0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1	150.0	75.0	25.0	3.0	0.50	1.5
5	750.0	375.0	125.0	15.0	2.50	7.5
10	1500.0	750.0	250.0	30.0	5.00	15.0
20	3000.0	1500.0	500.0	60.0	10.00	30.0
Media Simple	1500.0	750.0	250.0	30.0	5.0	15.0

Elemento

20.14	42.34
-------	-------

Tabla 2. Distribución de los tratamientos acotados por el arreglo Taguchi L25.

Material comercial ha ⁻¹						
Trat	kg					g
	HUM_LOMB	LIX_LOMB	CaSO ₄	K ₂ SO ₄	Algas	Micorrizas
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	0.0	75.0	25.0	3.0	0.5	1.5
3	0.0	375.0	125.0	15.0	2.5	7.5
4	0.0	750.0	250.0	30.0	5.0	15.0
5	0.0	1500.0	500.0	60.0	10.0	30.0
6	150.0	0.0	25.0	15.0	5.0	30.0
7	150.0	75.0	125.0	30.0	10.0	0.0
8	150.0	375.0	250.0	60.0	0.0	1.5
9	150.0	750.0	500.0	0.0	0.5	7.5
10	150.0	1500.0	0.0	3.0	2.5	15.0
11	750.0	0.0	125.0	60.0	0.5	15.0
12	750.0	75.0	250.0	0.0	2.5	30.0
13	750.0	375.0	500.0	3.0	5.0	0.0
14	750.0	750.0	0.0	15.0	10.0	1.5
15	750.0	1500.0	25.0	30.0	0.0	7.5
16	1500.0	0.0	250.0	3.0	10.0	7.5
17	1500.0	75.0	500.0	15.0	0.0	15.0
18	1500.0	375.0	0.0	30.0	0.5	30.0
19	1500.0	750.0	25.0	60.0	2.5	0.0
20	1500.0	1500.0	125.0	0.0	5.0	1.5
21	3000.0	0.0	500.0	30.0	2.5	1.5
22	3000.0	75.0	0.0	60.0	5.0	7.5
23	3000.0	375.0	25.0	0.0	10.0	15.0
24	3000.0	750.0	125.0	3.0	0.0	30.0
25	3000.0	1500.0	250.0	15.0	0.5	0.0
Suma ha	27000.0	13500.0	4500.0	540.0	90.0	270.0

La composta y el humus de lombriz se aplicaron al voleo, mientras que los hongos micorrízicos se distribuyeron en cuatro orificios de 10-15 cm de profundidad alrededor del área de goteo del árbol, concordando con los puntos cardinales, el CaSO_4 y K_2SO_4 fueron aplicados en banda a una profundidad de 10 cm.

2.4. SUPERFICIE DE RESPUESTA

El análisis de superficie de respuesta contempló los siguientes pasos: 1) ajuste del modelo y análisis de varianza para estimar los parámetros. La superficie estimada será típicamente curvada, una colina cuyo pico ocurre en el en el único punto estimado de máxima respuesta, un valle o una superficie en forma de silla (saddle) sin ningún máximo o mínimo; se determina a) si los tipos de efectos son lineales, cuadráticos o de productos cruzados, que tanto del error residual es debida a la falta de ajuste y cuál es la contribución de cada factor en el ajuste estadístico; 2) correlación canónica para investigar la forma de la superficie de respuesta predicha, se calcula si el punto fijo es un máximo, un mínimo o un punto silla (saddle) y cuál factor o factores son las respuestas predichas más sensibles y 3) análisis de cordillera (ridge) para la búsqueda de la óptima respuesta. Los eigenvalores y eigenvectores del análisis canónico caracterizan la forma de la superficie de respuesta; los eigenvalores señalan la dirección de la principal orientación de la superficie, y los signos y magnitudes de los eigenvectores asociados proporcionan la forma de la superficie en esas direcciones. Eigenvalores positivos indican direcciones de la curvatura hacia arriba y eigenvalores negativos indican direcciones de la curvatura hacia abajo. EL eigenvector para el eigenvalor más grande da la dirección de ascenso pronunciado a partir del punto fijo, si es positivo, o descenso pronunciado, si es negativo. Los eigenvectores correspondientes a eigenvalores pequeños o cero señalan direcciones de aplanado relativo. Para determinar si la solución es un máximo o mínimo, se observa el signo de los eigenvalores: Si los eigenvalores son todos negativos la solución es un máximo; si son todos positivos la solución es un mínimo, si tienen signos mezclados es un punto silla (saddle) y si contienen ceros la solución es un área aplanada.

2.5. PONDERACIÓN DE FACTORES Y VARIABLES

Dada la estructura factorial Taguchi L25 para la generación de tratamientos, el análisis estadístico se realizó mediante superficie de respuesta lineal y cuadrática completa, ajustando la superficie para determinar los niveles de los factores para respuesta óptima. Dicha técnica se emplea cuando cada factor tiene tres o más niveles; se estima

una superficie de respuesta por regresión con el método de mínimos cuadrados; para ello se utilizó el paquete estadístico SAS (SAS Institute Inc., SAS/STAT Software: Usage and Reference, Version 6, First Edition, Cary, NC: SAS Institute Inc., 1989).

El análisis para cada variable de respuesta incluyó tres etapas: 1) Análisis de la regresión y la contribución de cada factor al ajuste de la regresión; 2) análisis canónico de la superficie de respuesta para determinar la forma de la curva de aquellos factores que tuvieron respuesta significativa lineal, cuadrática e interacción de factores y 3) los valores predichos según se haya seleccionado la respuesta mínima o máxima de acuerdo con el rango original de los datos; se determina así mismo el porcentaje de incremento o decremento de la variable de respuesta y de cada uno de los factores para alcanzar el máximo o mínimo valor requerido.

Entonces, se resume el comportamiento de todas las variables de respuesta (agrupadas o no por categorías) en un cuadro donde se especifican los factores y la media simple para cada uno de ellos, se toman los eigenvalores resultantes expresados como porcentajes de la media, positivos o negativos según sea el caso; la contribución de los eigenvectores se expresa con signos redondeados a partir de 0.25 (es decir se parte del primer cuartil o mayor) tal que $0.2501 \leq + \leq 0.3749$, $0.3750 \leq + + \leq 0.6249$, $0.6250 \leq + + + \leq 0.8749$, $+ + + + > 0.8750$, lo mismo sería para el caso de eigenvectores negativos, de esta manera se pondera cuales factores son los que más influyen en esa variable.

Se obtiene la frecuencia de signos para cada eigenvalor y el total para los eigenvalores presentes, este total se multiplican por 0.20 (se seleccionan aquellos factores cuya frecuencia de signos sea mayor al 20% de los signos observados indistintamente positivos o negativos), posteriormente se obtiene el total de signos positivos y negativos, puesto que los eigenvectores positivos son considerablemente mayores a aquellos negativos, se seleccionarán aquellos factores de mayor peso cuya frecuencia de signos (coeficiente de eigenvectores) sea mayor al 0.20, para seleccionar aquellos factores de mayor peso de manera general para todas las variables de respuesta; de los factores seleccionados se obtiene la dosis máxima observada (siempre y cuando hayan sido seleccionados dentro de cada variable de respuesta). Un subsecuente análisis para apoyar la discusión estará conformado por la superficie de respuesta gráfica (lineal, cuadrática e interacción que hayan resultado significativas), de esta manera se calcula si los factores son independientes, presentan sinergismo o antagonismo y con ello se obtendrá el factor o factores más críticos de manera general para el estudio.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. CONTENIDO NUTRICIONAL FOLIAR PARA MACRONUTRIENTES

El análisis nutricional foliar es el método más adecuado para diagnosticar el estado nutricional del cultivo y evaluar la disponibilidad de reservas de la planta (Legaz *et al.*, 1995). El nitrógeno (N) es el elemento mineral que las plantas requieren en grandes cantidades y es considerado el nutriente limitante para el crecimiento y rendimiento de los cultivos (Antal *et al.*, 2010).

En el Cuadro 1 se observa que la media para la variable de Nitrógeno fue de 2.05%, sin embargo, el rango de datos fluctuó de 1.21 a 2.49%, para llegar al nivel máximo del % de N, existe una respuesta significativa del N, incrementando principalmente la aplicación de AlgaEnzims con un 8.5 L ha⁻¹, el Humus-líquido a 945.9 L ha⁻¹, CaSO₄ a 262.3 Kg ha⁻¹, y 15.6 Kg ha⁻¹ de Micorrizas, así como una interacción de Humus Líquido-AlgaEnzims, aumenta el % de N hasta un 2.49%. así como algunos factores incrementan para alcanzar el máximo de N, otros disminuyen como es el Humus sólido de la media simple de 1500.0 a 676.0 Kg Ha⁻¹, K₂SO₄ de 30 a 18.4 Kg ha⁻¹. En otro experimento realizado por Zuoping *et al.* (2014), se encontró respuesta a la aplicación de NPK en combinación con el humus.

Cuadro 1. Contenido nutricional foliar para nitrógeno total en granado tratado con materia orgánica, nutriente y microorganismos promotores del desarrollo vegetal. 2017.

Regresión		Factores kg - L ha ⁻¹					
		Hum_sol	Hum_liq	CaSO ₄	K ₂ SO ₄	AlgaEnzims	Micorrizas
		0.2160 ^v	0.2899	0.2564	0.2164	0.2152	0.7260
Lineal (L)	0.3092 ^v	C ^x		L			
Cuadrática(C)	0.7951	y	AlgaE				
Productos	0.2848						
Modelo	0.3542						
		R ² 0.9610		C.V. 5.15			μ 2.05
Análisis canónico de la superficie de respuesta							
Predicho punto fijo							
	36.5885	-8614.369	2167.6413	-7334.672	740.3956	108.3507	9483.9651
Eigenvalores							
	50.40	0.8303	0.0510	-0.2057	0.3423	-0.3854	-0.0013
	36.39	0.3480	0.5653	-0.0467	-0.1290	0.7349	-0.0198
	-11.57	-0.0729	-0.4274	-0.0660	0.7520	0.4898	-0.0472
	-20.27	-0.0700	0.4126	0.7963	0.4047	-0.1618	0.0260
Valores predichos							
Nt %	Error E.						Kg - L ha ⁻¹

1.21	0.342	1500.0	750.0	250.0	30.0	5.0	15.0
1.27	0.346	1496.0	785.4	241.9	28.9	5.4	15.2
1.33	0.349	1476.9	823.0	238.2	27.9	5.7	15.4
1.41	0.349	1436.9	857.2	237.4	26.8	6.2	15.5
1.51	0.342	1371.7	885.6	238.6	25.7	6.6	15.5
1.63	0.328	1282.6	907.1	241.5	24.5	6.9	15.5
1.76	0.306	1175.3	922.3	245.4	23.3	7.3	15.5
1.91	0.281	1056.8	932.6	250.0	22.0	7.6	15.6
2.08	0.253	932.3	939.3	254.9	20.8	7.9	15.6
2.27	0.229	804.9	943.5	260.0	19.6	8.2	15.6
2.49	0.214	676.0	945.9	262.3	18.4	8.5	15.6

Porcentaje de incremento (+) decremento (-) con respecto a la media simple

+105.8	-54.9	+26.1	+6.1	-38.5	+69.0	+3.8
--------	-------	-------	------	-------	-------	------

^USuperficie de respuesta máxima, análisis de cordillera (Ridge). μ Media general, C.V. Coeficiente de variación, R² Coeficiente de determinación. ^VProbabilidad de F: Pr \geq 0.05 No significativo, Significativo 0.05 \leq Pr \leq 0.01, altamente significativo Pr \leq 0.01. ^XRespuesta (Pr > | t |) significativa lineal (L), cuadrática (C); ^YProductos significativos de ese factor con el resto. Fuentes: Hum_Sol Humus de lombriz sólido (OptiHumus^{MR}), pH 8.12, CE 10.16 dS m⁻¹, M.O. 21.70%, C 12.59%, relación C/N 6.57, Nt 1.91%, P 0.96%, K 1.68%, Ca 3.52%, Mg 1.35%, Na 0.27%, Cu 34.04 mg L⁻¹, Fe 11850.3 mg L⁻¹, Mn 458.8 mg L⁻¹, Zn 173.7 mg L⁻¹, B 164.7 mg L⁻¹; Hum_Liq Humus de Lombriz líquido (OptiHumus^{MR}) pH 8.20, CE 4.06 dS m⁻¹, M.O. 0.11%, C 0.06%, relación C/N 3.13, Nt 0.02%, P 0.01%, K 0.13%, Ca 0.01%, Mg 0.004%, Na 0.02%, Cu 0.60 mg L⁻¹, Fe 3.70 mg L⁻¹, Mn 1.10 mg L⁻¹, Zn 0.11 mg L⁻¹, B 7.33 mg L⁻¹; CaSO₄_S (SoluGYp) 0.3131 CaO, 0.0072 MgO, 0.0013 SiO₂, 0.0021 Fe₂O₃, 0.0012 K₂O; K₂SO₄, Sulfato de potasio SOP51 Ultrasol SQM, 0-0-51-18, 51% K₂O; AlgaEnzims, extractos de algas marinas Palau Bloquim, contenido % M.O. 4.15, proteína 1.14, fibra cruda 0.43, cenizas 0.28, azúcares 0.13, grasas 0.03, K 1.48, N 1.45, Na 1.37, Mg 0.132, P 0.075, Ca 0.062, Zn 0.0505, Fe 0.044, Co 0.0275, Cu 0.0147, Mn 0.0072, Si 0.0004; Micorrizas (Sehumic-Vam^{MR}, *Acaulospora scobiculata*, *Gigaspora margarita*, *Glomus fasciculatum*, *G. constrictum*, *G. tortuosum*, *G. geosporum* con 20,000 esporas viables kg⁻¹). Valores críticos en grises son los eigenectores de mayor peso para ese eigenvalor. ^ZValores en negrillas corresponden a la media simple para ese factor.

Los factores que mayor impacto tuvieron en la variable de Nitrógeno fueron AlgaEnzims, Humus líquido y K₂SO₄. Esto nos indica que los niveles óptimos para obtener un porcentaje máximo en el contenido de N al 2.49%, fueron 676.0 Kg ha⁻¹ de Humus sólido, 945.9 L ha⁻¹ de Humus líquido, 262.3 Kg ha⁻¹ de CaSO₄, 18.4 Kg ha⁻¹ de K₂SO₄, 8.5 L ha⁻¹ de Alga Enzimas y por último 15.6 Kg ha⁻¹ de Micorrizas (Cuadro 1), García (2011) observó que en huertos en producción de granado alcanzaron valores promedio de 3,0% N en hojas jóvenes.

En estudios previos se observó que se presenta una correlación lineal positiva entre las concentraciones de N aplicadas y la concentración de N en la hoja en granada (Hasani *et al.*, 2016).

En nuestra investigación, se encontraron diferencias significativas en el análisis nutricional foliar por efecto de aplicación de las diferentes dosis de composta complementada con los fertilizantes inorgánicos y micorrizas, tanto para macronutrientes (N, Mg), como para micronutrientes (Cu, Fe, Mn, y Zn) (cuadros 2 y 3).

En el Cuadro 2 se observa el resumen de los resultados del análisis estadístico. Para las variables de macronutrientes, donde la media para N fue de 2.05%, P 0.169%, K 0.86%, Ca 1.67%, Mg 0.26%, Na 0.0108% y NO_3^- 2148.9 mg kg^{-1} , Otros estudios reportan las siguientes concentraciones N 1.96%, P 0.11%, K 0.73%, Ca 1.54%, Mg 0.30% y Na 0.0096% (Melgarejo *et al.* 2003). Giménez, *et al.* (1998), mostró los siguientes valores en la variedad 'Wonderful' N 1.89%, P 0.16%, K 1.00%, Ca 3.10%, Mg 0.24. En otro estudio en la variedad 'Hicaz Nar' (Korkmaz y Askin, 2015) encontraron los siguientes valores nutricionales N 1.66%, P 0.085%, K 0.82%, Ca 3.25%, Mg 1.10%.

Se observa que la χ^2 Frecuencia total observada para esa variable, se multiplica por el 20% para seleccionar los factores de mayor peso; χ^2 Frecuencia total para el conjunto de variables, se seleccionan aquellos variables y factores con un subtotal igual o mayor al 20%, indicándonos con esto que las variables de mayor peso fueron $\text{N} \geq 26$ y $\text{Mg} \geq 29$. Los principales factores que influyeron en la variable de N son: AlgaEnzims, Humus líquido, K_2SO_4 , así como la interacción de Humus Líquido-AlgaEnzims.

Cuadro 2. Resumen del contenido nutricional foliar para macronutrientes en granado tratado con materia orgánica, nutrientes y microorganismos promotores del desarrollo vegetal. 2017.

Eigenvalores	Hum_sol	Hum_líq	CaSO ₄	K ₂ SO ₄	AlgaEnzims	Micorrizas	Eigenvectores
	1500.0	750.0	250.0^T	30.0	5.0	15.0	Total, Frec. +/-
Nitrógeno 2.05 (1.21 – 2.49%)							
50.4 ^U	+++ ^W			+	--		6 4 / 2
36.4	+	++			+++		6 6 / 0
-11.6		--		+++	++		7 5 / 2
-20.3		++	+++	++			7 7 / 0
Frecuencia	4	6	3	6	7	0	26^Y 20 / 4
Kg - L ha ⁻¹	676.0	945.9	262.3	18.4	8.5	15.6	Selección \geq 5
Regresión	C	AlgaE	L				
Nitratos μ 2148.9 (4419.7 – 1295.3 mg kg^{-1})							
193.6		+++				++	5 5 / 0
-91.2	+++	--		+	-	++	9 6 / 3
-186.5			++	+	+++		6 6 / 0
Frecuencia	3	5	2	2	4	4	20 17 / 3
Kg - L ha ⁻¹	1405.1	617.2	317.8	33.3	6.8	13.8	Selección \geq 4
Regresión							
Fósforo μ 0.169 (0.279 – 0.156%)							
28.8		+++	++			++	7 7 / 0
-54.3	+++		-		-		5 3 / 2
Frecuencia	3	3	3	0	1	2	12 10 / 2
Kg - L ha ⁻¹	1500.0	750.0	250.0	30.0	5.0	15.0	Selección \geq 2

Regresión	C	CaSO ₄		C			
	CaSO ₄	Mico					
Potasio μ 0.86 (0.57 – 1.06%)							
68.3		--	+++	+	++	8	6 / 2
56.2	+++	+		+	++	7	7 / 0
-54.1		+++	++			+	6 6 / 0
Frecuencia	3	6	5	2	4	1	21 19 / 2
Kg – L ha ⁻¹	243.9	1142.5	214.1	29.0	5.1	14.2	Selección \geq 4
Regresión	C	K ₂ SO ₄	K ₂ SO ₄	C			
	Hum_liq			AlgaE			
	AlgaE						
Calcio μ 1.67 (1.39 – <u>3.83</u> %)							
68.3		--	+++	+	++	8	6 / 2
56.2	+++	+		+	++	7	7 / 0
-54.1		+++	++			+	6 6 / 0
Frecuencia	3	6	5	2	4	1	21 19 / 2
Kg - L ha ⁻¹	1888.0	557.0	350.5	43.0	8.6	15.8	Selección \geq 4
Regresión	L, C	L	C	L, C	L, C	L	
	CaSO ₄	CaSO ₄	AlgaE				
	K2SO ₄	Mico					
Magnesio μ 0.26 (0.19 – 0.33%)							
30.2	++	---				++	7 4 / 3
26.7	--		++	+	++		7 5 / 2
-10.4			--	+++		++	7 5 / 2
-22.7	+	++	++			+++	8 8 / 0
Frecuencia	5	5	6	4	2	7	29 22 / 7
Kg - L ha ⁻¹	1673.8	76.0	305.8	36.9	6.1	17.5	Selección \geq 6
Regresión	L, C	L, C	L, C	L, C	L, C	L	
	Hum_liq	CaSO ₄	K ₂ SO ₄	AlgaE			
	CaSO ₄	Mico	AlgaE				
	AlgaE						
Sodio μ 0.0108 (0.0128 – 0.0082%)							
30.6	+		+	+++	++	7	7 / 0
-28.7	--	+++	++			7	5 / 2
Frecuencia	3	3	3	3	2	0	14 12 / 2
Kg - L ha ⁻¹	614.4	1286.2	320.6	25.2	4.2	13.8	Selección \geq 3
Regresión							

Resumen							
Subtotal	<u>24</u>	<u>34</u>	<u>27</u>	19	<u>24</u>	15	143 143
Selección	2 / 7	6 / 7	5 / 7	2 / 7	5 / 6	3 / 7	Total, prop.+ / -
Proporción+/-	20 / 4	23 / 11	24 / 3	19 / 0	20 / 4	15 / 0	121 ^z / 22
Promotor %	83.3	67.6	88.9	100.0	83.3	100.0	Selección ≥ 24
Supresor %	16.7	32.4	11.1	0.0	16.7	0.0	
Máximo	1500.0	1286.2	350.5		8.6		

^TMedia simple niveles de los factores; ^UEigenvalores expresados como porcentaje de la media de la variable respuesta; ^VRango; ^WCada signo corresponde a múltiplos de 0.25 redondeado al cuarto más cercano; ^YFrecuencia total observada para esa variable, se multiplica por el 20% para seleccionar los factores de mayor peso; ^ZFrecuencia total para el conjunto de variables, se seleccionan aquellos variables y factores con un subtotal igual o mayor al 20%. Intervalo nutricional entre paréntesis, negrillas por debajo del rango óptimo, subrayado por encima del rango óptimo, de otra manera suficiente; regresión L lineal, C cuadrática, factores como interacción.

Marathe, *et al.* (2017) mencionan que los incrementos en el contenido de N, P, K y Mg en hoja, disminuyen el contenido de Zn y Mn conforme se incrementaba la dosis de aplicación de fertilizantes de N, P, K para el caso de granado variedad 'Arabi'. En este estudio se observa que el K ayuda que el N se encuentre en nivel optimos en cultivo de granado, por lo contrario (Plesis y Koen, 1984) mencionan que la deficiencia de K incrementa el contenido de N y Mg en las hojas. La relación anatogónica entre K y N está bien establecida, disminuye la toma de N debido a que se incrementa la fertilización con K en naranjo 'Valencia'.

Las concentraciones de N en la hoja que son menores del 2% generalmente se consideran bajo en muchos árboles frutales, incluidos almendros, manzanas, albaricoque, cereza, higo, limón y durazno (Benton-Jones *et al.*, 1991). Concentraciones similares de N en hoja (en el rango de 1.73% a 1.94%) se localizan en Iran, donde existen granados cultivados en campo sin ninguna fertilización (Hasani *et al.*, 2012, 2016) o con un manejo estándar de fertilizantes (Davaranpanah *et al.*, 2017). En uno de las principales áreas de cultivo de granada en Turquía, las concentraciones foliares de N en agosto fueron del 2.2%, siendo valores superiores a los encontrados por (Korkmaz y Askin, 2015).

En trabajos similares (Zaragoza *et al.*, 2011) observaron que la concentración nutrimental foliar, mostró diferencias significativas entre tratamientos para el K y para el Mg, sin diferencias para el resto de los elementos, para el caso de nogal pecanero.

El papel más conocido del magnesio (Mg) en las plantas es su presencia en el centro de la molécula de clorofila y por esto es esencial para la fotosíntesis, también está involucrado en el metabolismo de proteínas (Mengel y Kirkby, 2001). Por lo tanto, en el Cuadro 2 se observa que la media para la variable de Magnesio fue de 0.26%,

sin embargo, el rango de datos fluctuó de 0.19 a 0.33%, para llegar al nivel máximo del % de Mg, existe una respuesta significativa del Mg, incrementando principalmente la aplicación de Micorrizas 17.5 3 Kg ha⁻¹, CaSO₄ a 305.8 Kg ha⁻¹, así como una interacción de CaSO₄-K₂SO₄; CaSO₄-AlgaEnzims, aumenta el % de Mg hasta un 0.33%. así como algunos factores incrementan para alcanzar el máximo de Mg, otros disminuyen como es el Humus líquido de la media simple de 750.0 a 76.0 L ha⁻¹. Por su parte, Soto, *et al.* (2016). reportaron que la aplicación de hongos micorrízicos influyó en la producción y en el aumento del contenido de materia orgánica en el suelo.

En otro experimento realizado por Hernández, *et al.* (2014) observaron que el análisis nutricional de Mg, indica para la dosis de 10 t ha⁻¹ de composta más 436 kg ha⁻¹ de 11-52-00, reflejó una dinámica nutricional mayor a las demás dosis evaluadas, siendo para la dosis de 15 t ha⁻¹ de composta más 406 kg ha⁻¹ de 11-52-00, fue la que reflejó la menor concentración en la etapa de crecimiento del fruto y en la apertura del endocarpio en pistacho.

Los micronutrientes son aquellos elementos que los cultivos requieren en bajas cantidades y su concentración en el tejido vegetal es del orden de mg kg⁻¹. Hasta el momento, se incluyen al boro (B), cloro (Cl), cobre (Cu), hierro (Fe), manganeso (Mn), molibdeno (Mo), níquel (Ni) y Zinc (Zn) (Torri, *et al.*, 2014).

En el Cuadro 3 se observa el resumen de los resultados del análisis estadístico. Para las variables de micronutrientes, donde la media para Fe fue de 90.7 mg kg⁻¹, Mn 30.5 mg kg⁻¹, Zn 16.4 mg kg⁻¹, y Cu 9.9 mg kg⁻¹, mientras que en otros estudios el contenido de Fe, Mn y Zn fue de 113.16, 74.35 y 14.07 mg kg⁻¹, respectivamente en la variedad 'Ardestani' (Davarpanah, *et al.* 2018), donde el contenido de Fe y Mn se encuentran por arriba de nuestros valores.

Así como Korkmaz y Askin (2015) para Fe 97.92 mg kg⁻¹, Mn 15.0 mg kg⁻¹, Zn 11.18 mg kg⁻¹, y Cu 11.42 mg kg⁻¹, donde se observó que únicamente el contenido de Fe se encuentra por arriba de lo reportado aquí en este estudio, también Melgarejo, *et al.* (2003) encontró Fe 143.4 mg kg⁻¹, Mn 56.6 mg kg⁻¹, Zn 50.9 mg kg⁻¹, y Cu 18.4 mg kg⁻¹, estas concentraciones se encuentran por arriba de las concentraciones que se obtuvieron en este estudio. ²Frecuencia total para el conjunto de variables, se seleccionan aquellos variables y factores con un subtotal igual o mayor al 13%, indicándonos con esto que las variables de mayor peso fueron Fe ≥ 20, Mn ≥ 22, Zn ≥ 19 y Cu ≥ 21. Los principales factores que influyeron en la variable de Fe son: Humus líquido, CaSO₄, para Mn los factores que inciden son: Humus Sólida, Humus Líquido y CaSO₄, así como las interacciones de Humus Sólido con Humus líquido, CaSO₄, K₂SO₄ y AlgaEnzims.

Cuadro 3. Resumen del contenido nutricional foliar para micronutrientes en granado tratado con materia orgánica, nutrientes y microorganismos promotores del desarrollo vegetal. 2017.

Eigenvalores	Hum_sol	Hum_liq	CaSO ₄	K ₂ SO ₄	AlgaEnzims	Micorrizas	Eigenvectores
	1500.0	750.0	250.0^T	30.0	5.0	15.0	Total, Frec. +/-
Fierro 90.7 (107.9 – <u>89.2</u> mg kg ⁻¹)							
9.9 ^U		+++ ^W	+			++	6 6 / 0
-9.3		--	++	+++		+	8 6 / 2
-16.5	+++		-		--		6 3 / 3
Frecuencia	3	<u>5</u>	<u>4</u>	3	2	3	<u>20^Y</u> 15 / 5
Kg - L ha ⁻¹	1500.0	750.0	250.0	30.0	5.0	15.0	Selección ≥ 4
Regresión							
Manganeso μ 30.5 (15.3 – 32.3 mg kg ⁻¹)							
39.3	--	+++			+		6 4 / 2
20.8	--	--	++		+	+	8 4 / 4
-17.0	++	+	++	+	+	+	8 8 / 0
Frecuencia	<u>6</u>	<u>6</u>	<u>4</u>	1	3	2	<u>22</u> 16 / 6
Kg - L ha ⁻¹	1769.2	80.8	188.2	24.6	3.7	13.9	Selección ≥ 4
Regresión	Hum_liq	C					
	CaSO ₄	Mico					
	K ₂ SO ₄						
	AlgaE						
Zinc μ 16.4 (11.0 – <u>34.3</u> mg kg ⁻¹)							
103.5	+++		+		++		6 6 / 0
64.1	--	+			+++		6 4 / 2
-69.8		++	++	++	-		7 6 / 1
Frecuencia	<u>5</u>	3	3	2	<u>6</u>	0	<u>19</u> 16 / 3
Kg - L ha ⁻¹	1992.8	872.9	307.2	27.1	9.5	14.8	Selección ≥ 4
Regresión	L, C	CaSO ₄	K ₂ SO ₄	L	L, C	L	
		AlgaE	AlgaE				
Cobre μ 9.9 (8.3 – <u>15.5</u> mg kg ⁻¹)							
41.1	+++		+		++		6 6 / 0
25.0	--	-	+++		+		7 4 / 3
-28.9		+++	++	++	-		8 7 / 1
Frecuencia	<u>5</u>	<u>4</u>	<u>6</u>	2	<u>4</u>	0	<u>21</u> 17 / 4
Kg - L ha ⁻¹	2059.1	775.8	366.3	30.8	9.0	15.2	Selección ≥ 4
Regresión							
Resumen							
Subtotal	<u>19</u>	<u>18</u>	<u>16</u>	8	<u>15</u>	5	82 82
Selección	3 / 4	3 / 4	3 / 4	0 / 4	5 / 6	0 / 4	Total, prop.+ / -

Proporción+/-	11 / 8	13 / 5	15 / 1	8 / 0	11 / 4	5 / 0	64 ^Z / 18
Promotor %	57.9	72.2	93.8	100.0	73.3	100.0	Selección ≥ 13
Supresor %	42.1	27.8	6.2	0.0	26.7	0.0	
Máximo	2059.1	775.8	366.3		9.5		

^TMedia simple niveles de los factores; ^UEigenvalores expresados como porcentaje de la media de la variable respuesta; ^VRango; ^WCada signo corresponde a múltiplos de 0.25 redondeado al cuarto más cercano; ^YFrecuencia total observada para esa variable, se multiplica por el 20% para seleccionar los factores de mayor peso; ^ZFrecuencia total para el conjunto de variables, se seleccionan aquellos variables y factores con un subtotal igual o mayor al 20%. Intervalo nutricional entre paréntesis, negrillas por debajo del rango óptimo, subrayado por encima del rango óptimo, de otra manera suficiente; regresión L lineal, C cuadrática, factores como interacción.

para Zn: AlgaEnzims y Humus Sólido y por ultimo para el Cu fue: CaSO₄, Humus Sólido, Humus líquido y AlgaEnzims. La mayoría de los micronutrientes se encuentran asociados con enzimas que regulan distintos procesos metabólicos, principalmente la respiración (Cu, Fe, Mn, Zn), la fotosíntesis (Cu, Mn) y la síntesis de clorofila (Cu, Fe, Zn). El Mn interviene, además, en el proceso de regulación enzimático y la permeabilidad de las membranas (Torri, *et al.*, 2014).

Si bien el desarrollo y el crecimiento de las plantas está vinculado a las respuestas de factores del medio ambiente también está altamente regulados por complejos y acción coordinada por hormonas endógenas y bioestimulantes, estos poseen la capacidad de incrementar la productividad y calidad a través de su influencia en procesos metabólicos (Rahman *et al*, 2013). Los bioestimulantes son conocidos por mejorar la apariencia y el tamaño de la fruta de granado, además de la calidad del arilo (parte acuosa) (Rahman *et al*, 2013).

El uso de extractos derivados de algas marinas en la agricultura ha tenido un crecimiento importante (Zodape *et al*, 2011). Son considerados como bioestimulantes y no como fertilizantes debido a que su preparación se diluyen con altas cantidades de agua (relaciones de 1:1000) que no permite la adición significativa de nutrientes (Briceño-Domínguez, 2011).

El principio fisiológico en el que estos productos basan su éxito es la rápida recuperación de elementos hormonales y nutricionales de los cultivos acuáticos, propiedades que se transfieren a los cultivos agrícolas mediante su aplicación (Carrera y Canacuán, 2011).

La aplicación foliar de algas marinas en el cultivo de frijol puede significar incrementos que van desde el 30-40% (Zodape *et al*, 2010; Pramanick *et al*, 2013). Por otra parte, en el cultivo de soya se han reportado incrementos de hasta 57% en su rendimiento con aplicaciones foliares de este bioestimulante (Rathore, 2009; Kumar y Sahoo, 2011).

Canales (1999) menciona que las algas marinas se aplican en la agricultura en forma de harina, extractos y polvos solubles. Algunos experimentos que se han realizado en diversos países demuestran la efectividad de las algas marinas en cultivos como: el cacahuete, en el cual incrementó el volumen de semilla, el contenido de proteína; coliflor, el diámetro del florete se incrementó significativamente; en crisantemo, se redujo considerablemente la población de araña roja y de áfidos; en chile pimiento, se incrementó la absorción de B, Cu, Fe, Mn y Zn; en maíz y frijol, se obtuvieron incrementos en el rendimiento de 1.5 % y 7.7 %, respectivamente; en pepino cv. 'pepinova', el rendimiento se incrementó más de 40 %, la vida de anaquel se incrementó de 14 a 21 días y se redujo la población de araña roja; y en Tomate, se incrementó la resistencia a heladas. La aplicación de algas marinas como bioestimulantes son una tecnología muy prometedora, los resultados en su aplicación práctica son favorables, además de que son amigables con el ambiente, pues no contaminan ni son residuales.

4. CONCLUSIONES

- Las aportaciones de enmiendas orgánicas (HS, HL y AE), mejoraron el contenido foliar de N, Mg, Fe, Mn, Zn y Cu.
- El uso de CaSO_4 influyó principalmente en la concentración nutricional de microelementos Fe, Mn, Zn y Cu.
- La fertilización con humus sólido, humus líquido y AlgaEnzims complementada con CaSO_4 se considera una buena estrategia de fertilización en granado para sentar las bases para una producción sostenible y presente beneficios al medio ambiente.

BIBLIOGRAFÍA

Antal, T.; Mattila, H.; Hakala-Yatkin, M.; Tyystjarvi, T. and Tyystjarvi, E. 2010. Acclimation of photosynthesis to nitrogen deficiency in *Phaseolus vulgaris*. *Planta* 232:887-898.

APHA, 1992. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. APHA American Public Health Association.

Bastida F., Torres I.F., Hernández T., García C., The impacts of organic amendments: Do they confer stability against drought on the soil microbial community?, *Soil Biology & Biochemistry*. **2017**, *113*, 173-183, <http://dx.doi.org/10.1016/j.soilbio.2017.06.012>.

Benton Jones Jr, J., Wolf, B., Mills, H.A., 1991. Plant Analysis Handbook: A Practical Sampling, Preparation, Analysis, and Interpretation Guide. Micro-Macro-Publishing, Athens, GA, U.S.A.

Blumenfeld, A., Shaya, F., Hillel, R., 2000. Cultivation of pomegranate. *Options Méditerranéennes Ser. A* 42, 143-147.

Bremner, J. M. and C. S. Mulvaney. 1982. Nitrogen-total. Methods of Soil Analysis In: Page, A. L., R. H. Miller, D. R. Keeney (eds). Agronomy No. 9, part 2. 2nd edition. ASA Soil Science Society or American Books. Madison. W. I., USA. p. 495-624.

Briceño-Domínguez, R. 2011. Producción y Evaluación de Extractor Líquidos obtenidos a partir de Alga Gigante *Macrocystis Pyrifera* (L.) C. Agardh, como estimulantes del crecimiento vegetativo. Tesis de Maestría. CICIMAR-IPN. La Paz, B.C.S. México. 86pp.

Canales, L. B. 1999. Enzimas-algas: posibilidades de su uso para estimular la producción agrícola y mejorar los suelos. Terra latinoamericana. Vol. 17, no. 3, p.271-276.

Carpio, C. 2013. Bases para el manejo integrado del chanchito blanco (*pseudococcus viburni*) en granado (*punica granatum*): evaluación de métodos de seguimiento y control (Tesis para optar al grado de magister) Universidad de Chile, Chile. Recuperado de: <http://repositorio.educacionsuperior.gob.ec/bitstream/28000/1342/1/T-SENESCYT-00468.pdf>

Carrera, D. y Canacuan A. 2011. Efecto de tres bioestimulantes orgánicos y un químico en dos variedades de frijol arbustivo, cargabello y calima roja (*Phaseolus vulgaris* L.) en coatacachi-imbabura. Universidad Técnica del Norte Ecuador.

Cottenie, A. 1994. Workshop on Standardization of Analytical Methods for Manure, Soil Plant and Water. Commission European Communities. FAO Soils Bulletin 38/2. pp: 28-33.

Cucci, G., Lacolla, G., Summo, C., & Pasqualone, A. Effect of organic and mineral fertilization on faba bean (*Vicia faba* L.). *Sci. Hortic. Amsterdam*, **2019**, *243*, 338-343, <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.08.051>.

Davarpanah, S., Tehranifar, A., Davarynejad, G., Abadía, J., Khorasani, R., 2016. Effects of foliar applications of zinc and boron nano-fertilizers on pomegranate (*Punica granatum* cv. Ardestani) fruit yield and quality. *Sci. Hortic.* 210, 57–64.

Davarpanah, S; Tehranifar, A; Davarynejad, G; Mehdi A, I; Abadía, J; Khorassani, R. 2017. Effects of Foliar Nano-nitrogen and Urea Fertilizers on the Physical and Chemical Properties of Pomegranate (*Punica granatum* cv. Ardestani) Fruits. *HORTSCIENCE* 52(2):288–294. 2017. doi: 10.21273/HORTSCI11248-16

Davarpanah, S; Tehranifar, A; Abadía, J; Val, J; Davarynejad, G; Aran, M; Khorassanid, R. 2018. Foliar calcium fertilization reduces fruit cracking in pomegranate (*Punicagranatum*cv. Ardestani). *Scientia Horticulturae* 230 (2018) 86–91.

El-Rahman, A.A., A. Naira, A. Moieza. 2013. Effect of plant biostimulants on fruit cracking and quality attributes of pomegranate cv. Kandhari kabuli. *Academic journals, Scientific Research and essays*. DOI: 0.5897/SRE2013.702.

García Gómez, K. I. 2011. Estimación de la acumulación de biomasa y extracción estacional de nitrógeno, fósforo, potasio, calcio y magnesio en plantas de granado (*Punica granatum* L.). Tesis Maestría en ciencias agropecuarias: Producción frutícola. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas, Escuela de Posgrado. Santiago de Chile p.104.

Giménez, M., Martínez, J., Oltra, M.A., Martínez, J.J., Ferrández, M., 2000. Pomegranate (*Punica granatum* L.) leaf analysis: correlation with harvest. *Options Méditerranéennes Ser. A* 42, 179–185.

Glozer, K., Ferguson, L., 2008. Pomegranate Production in Afghanistan. University of California, Davis. College of Agricultural and Environmental Sciences, pp. 32.

- Hasani, M., Zamani, Z., Savaghebi, G., Fatahi, R., 2012. Effects of zinc and manganese as foliar spray on pomegranate yield, fruit quality and leaf minerals. *J. Soil. Sci. Plant Nutr.* 12, 471–480.
- Hasani, M., Zamani, Z., Savaghebi, G., Sheikh Sofla, H., 2016. Effect of foliar and soil application of urea on leaf nutrients concentrations, yield and fruit quality of pomegranate. *J. Plant Nutr.* 39, 749–755.
- Hernández, F., Legua, P., Melgarejo-Sánchez, P., Martínez Font, R., 2012. The pomegranate tree in the world: its problems and uses. *Options Méditerranéennes Ser. A* 103, 11–26.
- Hernández, S. R.; Sánchez, Ch. E.; Guerrero, M. S.; Rivas, L. B. A.; Anchondo, N. A. 2014. Fertilización orgánica complementada con inorgánica en pistacho: efecto sobre la dinámica nutricional foliar y rendimiento. *Rev. Mex. Cienc. Agríc* vol.5 no.4 Texcoco jun./ago. 2014.
- Holland, D., Bar-Ya'akov, I., 2008. The pomegranate: new interest in an ancient fruit. *Chron. Hort.* 48 (3), 12–15.
- Korkmaz, N., Askin, M.A., 2015. Effects of calcium and boron foliar application on pomegranate (*Punica granatum* L.) fruit quality yield, and seasonal changes of leaf mineral nutrition. *Acta Hortic.* 1089, 413–422.
- Kumar, G. y D. Sahoo. 2011. Effect of seaweed liquid extract on growth and yield of *Triticum Aestivum* va. Pusa Gold, *Journal of Applied Phycology* 23(2):251-255.
- Latsague, M., Sáez, P., Mora, M. Efecto de la fertilización con nitrógeno, fósforo y potasio, sobre el Contenido foliar de carbohidratos, proteínas y pigmentos fotosintéticos en plantas de *Berberidopsis corallina* Hook.f. *Gayana Bot.*, **2014**, 71(1), 37-42, ISSN 0016-5301.
- Levin, G.M., 2006. Pomegranate, first ed. Third Millennium Publishing, Tempe.
- Marathe, R.A., Sharma, J., Murkute, A.A., Babu, K.D., 2017. Response of nutrient supplementation through organics on growth, yield and quality of pomegranate. *Sci. Hortic.* 214, 114–121.
- Martínez, J.; Melgarejo, P.; Fernández, F.; Martínez, R.; Leguía, P. 2004. Comparación de la fenología floral de cuatro clones de granado (*Punica granatum* L.). *Fruticultura Profesional* 141: 33-44.
- Márquez Q. C., Cano-Ríos P., Moreno R. A., Figueroa-Viramontes U., Sánchez C. E., De la Cruz-Lázaro E., Robledo-Torres V. Efecto de la fertilización orgánica sobre el rendimiento y contenido nutricional de tomate saladette en invernadero. *ITEA*, **2010**, 110 (1), 3-17. <http://dx.doi.org/10.12706/itea.2014.001>.
- Melgarejo, P. & Salazar, D. 2003. Tratado de fruticultura para zonas áridas y semiáridas. Vol. II. Ediciones MV y Ediciones Mundi-Prensa. Madrid. España. pp. 194-195.
- Mengel, K., Kirkby, E.A., 2001. Principles of Plant Nutrition. Kluwer Academic Publisher, ISBN: 978-94-010-1009-2
- Plesis SF, Du, Koen TJ (1984) Effect of nitrogen on fruit size of citrus. In: Proceedings of international society of citriculture, vol I, pp 148–150.
- Pramanick, B., K. Brahmachari, A. Ghosh. 2013. Effect of seaweed asps on growth and yield improvement of green gram. *African Journal of Agricultural Research.* 8(13):1180-1186.
- Rajaei, H & Yazdanpanah, P. 2015. Buds and leaves in pomegranate (*Punica granatum* L.): Phenology in relation to structure and development. *Flora* 214: 61-69.

Romiti, Noemí Amelia. (1951). Determinación de nitratos por el método de la brucina: su aplicación a la determinación de nitratos en aguas de consumo. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires. http://digital.bl.fcen.uba.ar/Download/Tesis/Tesis_0670_Romiti.pdf

Soto-Parra, J., Sánchez-Chávez, E., Pérez-Leal, R., Piña-Ramírez, F., Basurto-Sotelo, M., 2016. Alternativas orgánicas para disminuir la aplicación de nitrógeno en nogal pecanero. *Nova Scientia*. 2016, 140-161.

Stover, E., Mercure, E.W., 2007. The pomegranate: a new look at the fruit of paradise. *HortScience* 42 (5), 1088-1092.

Tarango R. S., Moorillón, V. N., Borunda, E. O. Growth, yield, and nutrient status of pecans fertilized with biosolids and inoculated with rizosphere fungi. *Bioresource. Technol.*, 2009, 100(6), 1992-1998, doi: 10.1016/j.biortech.2007.12.078.

Torri, S. I., S. Urricariet, y R. S. Lavado. 2014. Micronutrientes y elementos traza. Pp: X-XX. En: H. E. Echeverría, y F. O. García. *Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos*. Editorial INTA, Buenos Aires, Argentina.

Zaragoza, L. M. M.; Preciado, R. P.; Figueroa, V. U.; García, H. J. L.; Fortis, H. M.; Segura, C. M. A.; Lagarda, M. A.; Madero, T. E. 2011. Aplicación de composta en la producción del nogal Pecanero. *Revista Chapingo. Serie Horticultura. Rev. Chapingo Ser.Hortic vol.17(1), 33-37. spe 1 Chapingo ene. versión On-line ISSN 2007-4034versión impresa ISSN 1027-152X.*

Zodape, S. A., S. Gupta, R. Bhandari, D. Rawat, K. Chaudhary, J. Essartant y J. Chikara. 2011. Folie application of seaweed sap as biostimulant for enhancement of yield and quality of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill). *Journal of Scientific & Industrial Research*. Vol:70. 215-219.

Zuoping, Z., Y. Sha, L. Fen, J. Puhui, W. Xiaoying, and T. Yan'a. 2014. Effects of chemical fertilizer combined with organic manure on Fuji apple quality, yield and soil fertility in apple orchard on the Loess Plateau of China. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 7(2):45-55.

MORPHOLOGICAL AND BIOCHEMICAL BEHAVIOR OF THE OLIVE TREE IN SEMI-ARID AREAS OF ALGERIA

Data de submissão: 02/05/2026

Data de aceite: 19/05/2026

Dhia Gharabi

Laboratory of Molecular and Cellular Biology
Faculty of Nature and Life Sciences
Ibn Khaldoun University, 14000
Tiaret, Algeria

<https://orcid.org/0000-0002-0194-0091>

Magheni Benchohra

Ibn Khaldoun University
Tiaret, Algeria

<https://orcid.org/0000-0002-0980-5679>

Ahmed Bellhabib

National School of Agronomy 16000
Algiers, Algeria

Abdelkarim Hassani

Laboratory of Agrobiotechnology and Nutrition in Dry Areas
Ibn Khaldoun University 14000
Tiaret, Algeria

ABSTRACT: In Algeria, as in many agricultural regions of the Mediterranean countries, the cultivation of the olive tree (*Olea europaea*

L.) has an important place in sustainable development, the economy, and in combating desertification. The Algerian government has implemented an olive tree planting program with an area of 900,000 ha by 2024. In this regard, the present study aims to determine the variability of the morphological and biochemical parameters of 10 varieties of olive tree of Algerian origin: Hamra, Sigoise, Aimel, Longue de Meliana, Mission, Guergour, Manzanite, Agnoun, Chemlal and Sofiana, having been the subject of an extension to the level of the semi-arid zone, carried out intensively, under localized irrigation, with controlled fertilizer inputs. The experiment started with on-site morphological measurements of tree height, trunk height and canopy circumference followed by laboratory analyzes by determining leaf area, relative water content and content in chlorophyll pigments. Graphical representations, comparisons of means, minimums and maximums, one-way analysis of variance on the one hand and PCA and AHC on the other hand were established between the studied parameters, in order to assess their variability. The results obtained showed that even if the olive tree is grown under the same growing conditions; varieties behave in different ways. These differences must be taken into account when choosing varieties in the plantation of mono-varietal or multi-varietal olive orchards.

KEYWORDS: steppe; olive tree; morphology; physio-biochemical; PCA.

COMPORTAMENTO MORFOLÓGICO E BIOQUÍMICO DA OLIVEIRA EM ZONAS SEMIÁRIDAS DA ARGÉLIA

RESUMO: Na Argélia, tal como em muitas regiões agrícolas dos países mediterrânicos, o cultivo da oliveira (*Olea europaea* L.) ocupa um lugar importante no desenvolvimento sustentável, na economia e no combate à desertificação. O governo argelino implementou um programa de plantação de oliveiras com uma área de 900.000 ha até 2024. Neste contexto, o presente estudo tem como objetivo determinar a variabilidade dos parâmetros morfológicos e bioquímicos de dez variedades de oliveira de origem argelina: Hamra, Sigoise, Aimel, Longue de Meliana, Mission, Guergour, Manzanite, Agnoun, Chemlal e Sofiana, tendo sido alvo de uma extensão à zona semiárida, realizada de forma intensiva, sob irrigação localizada, com aportes controlados de fertilizantes. A experiência começou com medições morfológicas no local da altura da árvore, altura do tronco e circunferência da copa, seguidas de análises laboratoriais através da determinação da área foliar, do conteúdo relativo de água e do teor de pigmentos clorofilinos. Foram estabelecidas representações gráficas, comparações de médias, mínimos e máximos, análise de variância a um critério, bem como ACP e CHA entre os parâmetros estudados, a fim de avaliar a sua variabilidade. Os resultados obtidos mostraram que, mesmo quando a oliveira é cultivada nas mesmas condições de crescimento, as variedades comportam-se de maneiras diferentes. Estas diferenças devem ser tidas em conta na escolha das variedades para plantação de olivais mono-varietais ou multi-varietais.

PALAVRAS-CHAVE: estepe; oliveira; morfologia; fisiobioquímica; ACP.

1. INTRODUCTION

The cultivation of the olive tree is very closely linked to the Mediterranean region; In addition to its economic, social and ecological interest, the olive fruit and oilseed cultivation has a prominent place in Algeria. The consumption of olive oil has also grown in traditionally non-producing countries such as the USA, Australia and Japan (Pineli et al. 2003).

The Algerian olive grove represents around 33% of tree production. The favorable climate and ancestral olive-growing traditions constitute competitive advantages for the development of the olive sector and for contributing to self-sufficiency in vegetable oils (Hadj Sadok et al., 2018). Olive growing in Algeria covers an area of 432 961 ha producing 684 461 tonnes or 3.3% of world production for the year 2017 (FAO, 2019).

The olive tree and other fruit trees (almond trees, pistachio trees, etc.) play a vital role in the balance of the semi-desert ecosystem (Lazzeri, 2009). The olive tree in particular is resistant to arid conditions where it is left to itself to give fruit one year out of two, but if we give it a lot of care and patience it will develop in an extraordinary way and produce olives in sufficient quantity and of good quality.

The wilaya of Tiaret, located between the massif of Western “Ouarsenis” to the north and the semi-arid highlands from the south to the west of Algeria, is characterized by its varied relief and an altitude between 800-1200 m. The commune of Rechaiga is part of the wilaya of Tiaret and it is characterized by a dry and hot climate. The selected olive trees are cultivated in a farm in this region, yet they are irrigated and fertilized in fall and spring.

The main objectives of the study at hand are threefold: (1) to make a comparison of the 10 varieties of olive tree (Hamra, Sigoise, Aimel, Longue de Meliana, Mission, Guergour, Manzanite, Agnoun, Chemlal and Sofiana); introduced by the Technical Institute of Fruit and Vine Arboriculture; (2) to determine which ones have adapted very well to the new conditions in the area; and (3) to classify them according to their morphological, biochemical and physiological expressions in the arid zone.

2. MATERIALS AND METHODS

The experiment of this study was carried out on a young olive farm (130 ha olive trees) located in northwestern Algeria, more precisely in a semi-arid zone in the commune of Rechaiga, Wilaya of Tiaret. This farm was planted intensively in 2017 under localized irrigation at a planting density of 400 trees/ha and a spacing of 4/5 m.

The experimental orchard of our study consists of ten varieties of olive (Hamra, Sigoise, Aimel, Longue de Meliana, Mission, Guergour, Manzanite, Agnoun, Chemlal and Sofiana).

This work was carried out in April 2021. A total of 130 trees were sampled using exclusively vegetative and clonal sampling to avoid genetic change. For a detailed description of tree shape, we measured the following parameters.

Since the canopy was fully visible, we measured canopy height, canopy circumference, tree height, trunk height, and trunk diameter. At the same time, we sampled 13 leaves per adult tree from the middle part of the most representative shoots chosen at breast height. The collected samples were placed inside labeled bags, carefully labeled with their identifying names.

The harvested and labeled plant material was transported to the laboratory of the Faculty of Nature and Life Sciences, Ibn Khaldoun University, Tiaret, Algeria, for the determination of chlorophyll and carotenoid contents.

The results were subjected to statistical analysis using R software (version 4.1.2), including one-way ANOVA, correlations between variables, and principal component analysis (PCA).

2.1. MORPHOLOGICAL PARAMETERS

Plant height was measured using a TRUPULSE 200L dendrometer rangefinder, with much improved accuracy.

The height of the trunk was determined using a graduated board.

The height of foliage is the distance between the end of the bole and the top of the tree; measured with a dendrometer, by the difference between two measurements.

The foliage circumference was measured using a measuring tape graduated in centimeters.

The diameter of the trunk was measured by a digital caliper.

Leaf area was directly measured by the LICOR-3000A electronic planimeter (Cheverry, 1995) with a resolution of 1 mm².

2.2. BIOCHEMICAL PARAMETERS

2.2.1. Content of chlorophyll pigments

The method of LICHTENTHALER, (1987) and Shabala et al (1998) was used to determine the contents of pigments (chlorophylls, chlorophyll a, chlorophyll b and carotenoids).

100 mg of the middle part of the penultimate leaf was placed in a test tube containing 10 ml of 95% acetone at 4°C. The tubes are placed in the dark for 48 hours.

After 48 hours, the optical density (OD in nm) was read using a spectrophotometer (Pharmacist biotech NOVASEC II type) at wavelengths of 663, 645 and 470 nm which correspond to the peaks of absorption of chlorophyll "a", chlorophyll b and carotenoid pigments. And finally, we calculated the quantities of chlorophylls a and b (expressed in µg/g FW) by the following formulas:

- ✓ Chl a = $9.78 \times OD_{663} - 0.99 \times OD_{645}$
- ✓ Chl b = $21.42 \times OD_{645} - 4.65 \times OD_{663}$
- ✓ Carotenoids = $[1000 \times OD_{470} - 1.90 \times Chl\ a - 63.14 \times Chl\ b] / 214$

2.3. PHYSIOLOGICAL PARAMETERS

2.3.1. Relative water content (RWC)

Relative water content (RWC) was determined by the method of Barrs and Weatherley (1962) according to the formula of Clark and McCaig (1982) and used by Rascio et al. (1988).

After leaf excision, the initial fresh weight (IFW) was determined. Then the leaf was placed in a test tube containing distilled water. The tube was kept in the dark at 4 °C for 12 hours.

The leaves were then reweighed to obtain the full turgor weight (WFT). The dry weight (DW) was obtained by drying the leaves in an oven at 80 °C for 48 hours.

The relative water content was calculated using the following equation:

$$\text{RWC (\%)} = [(IFW - DW) / (WFT - DW)] \times 100$$

3. RESULTS

- a. Plant height.** The data displayed in (figure 1) indicate that there are variations in. The results of the analysis of variance with one classification criterion (table 1), reveal very significant differences ($F = 34.65$ and $P = 00$) between the genotypes for plant height (at the binary error threshold 5%).

Figure 1: Histogram representing plant height of the studied varieties.

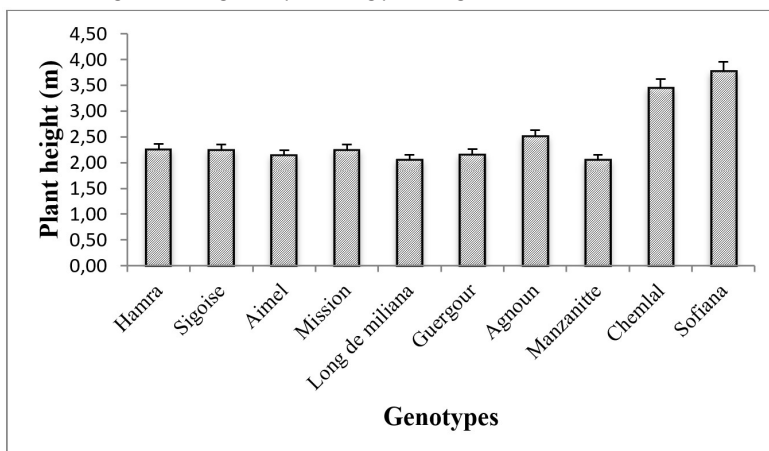


Table 1: Results of the one-way analysis of variance for the plant height trait of the studied genotypes.

	SS	df	MS	F	p-value
Total genotypes	1157.357	1	1157.357	1338.625	0.000000
genotypes	111.990	9	12.443	14.392	0.000000

- b. Height of the trunk.** The histogram (figure 2) shows that there are variations in the height of the trunk of the ten studied genotypes. The results of the analysis of variance with one classification criterion (table 2), reveal very highly significant differences ($F = 9.566$ and $p = 0.0000$ at the 5% error threshold) for the varietal effect for the height of the genotypes studied.

Figure 2: Histogram representing trunk height of the studied varieties.

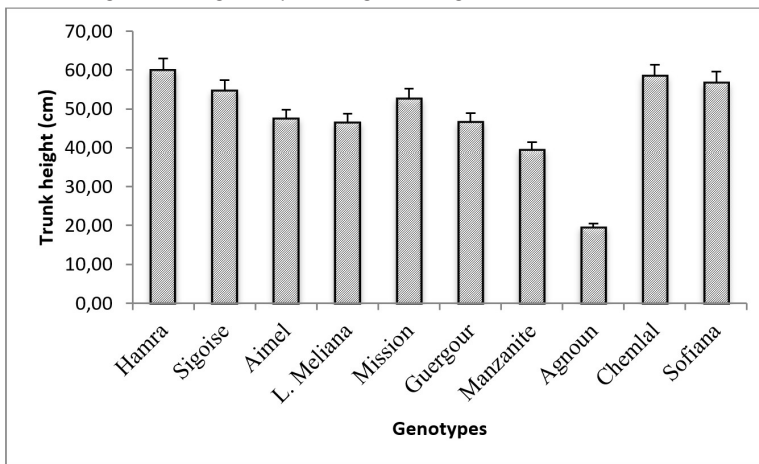


Table 2: Results of one-way analysis of variance for the height trait of the studied genotypes.

	SS	df	MS	F	p-value
Total genotypes	298677.8	1	298677.8	1614.519	0.0000
genotypes	15927.7	9	1769.7	9.566	0.0000

- c. **Canopy height.** The obtained results in (figure 3) demonstrate that the height of canopy of each genotype varies. The same effect (table 3) is observed during the one-way variance analysis of crown height at the error threshold of 5%. The statistical results seem very strongly significant ($p = 0\%$), for the varietal effect on the height of the crown of the varieties studied.

Figure 3: Histogram representing canopy height of the studied varieties.

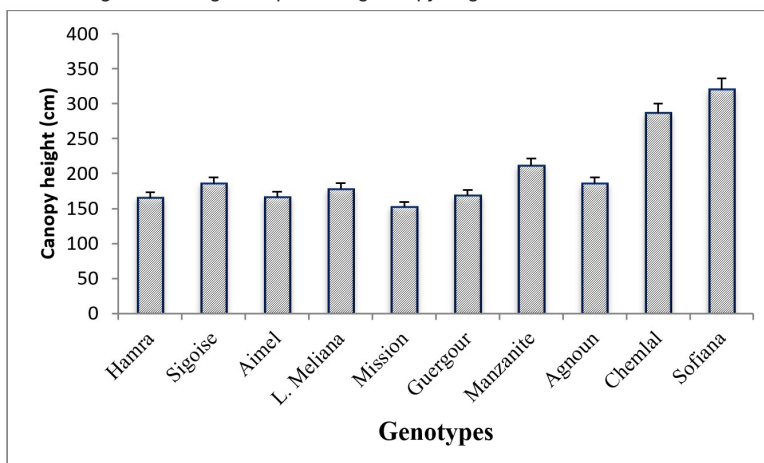


Table 3: Results of the one-way analysis of variance for the crown height trait studied genotypes.

	SS	df	MS	F	p-value
Total genotype	5261690	1	5261690	4369.674	0.0000
genotypes	380386	9	42265	35.100	0.0000

- d. The foliage circumference.** The histogram (figure 4) represents the circumference of the foliage. It also shows variation for the ten genotypes studied. The results of the analysis of variance with one classification factor (Table 4), reveal very strongly significant differences ($F = 7.1114$ and $p = 0.0000$ at the error threshold of 5%) for the varietal effect for the circumference of the canopy, the genotypes studied.

Figure 4: Histogram representing foliage circumference of the studied varieties.

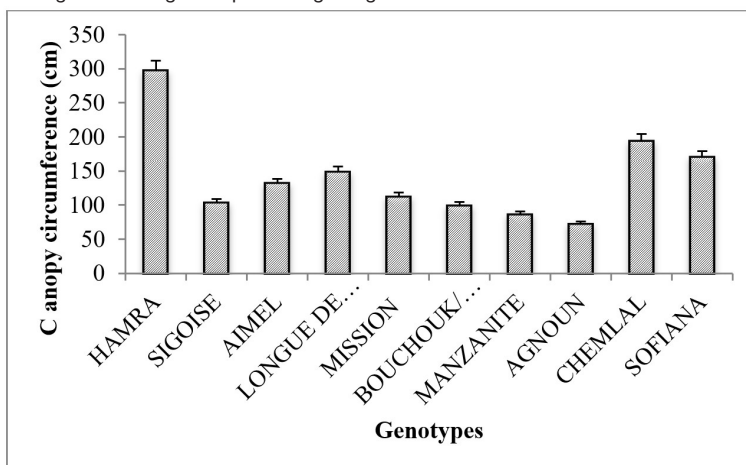


Table 4: Results of the one-way analysis of variance for the leaf circumference character of the studied genotypes.

	SS	df	MS	F	p-value
Total genotypes	2582208	1	2582208	330.5531	0.000000
genotypes	499973	9	55553	7.1114	0.000000

The comparison of the minimum and maximum means (figure 4) of the canopy circumference shows an average of 141.02 ± 62.24 cm with a maximum recorded by the **Hamra** variety of 297.15 cm and a minimum of 73.67 cm recorded by the variety **Agnoun**.

- e. Diameter of the trunk.** the graphic representation (figure 5) of the diameter of the trunk shows that the ten genotypes studied show variations. The

results of the analysis of variance with a classification factor (Table 4), reveal very highly significant differences ($F = 54.103$ and $p = 0.0000$ at the 5% error threshold) for the varietal effect for the circumference of the canopy, the genotypes studied.

Figure 5: Histogram representing trunk diameter of the studied varieties.

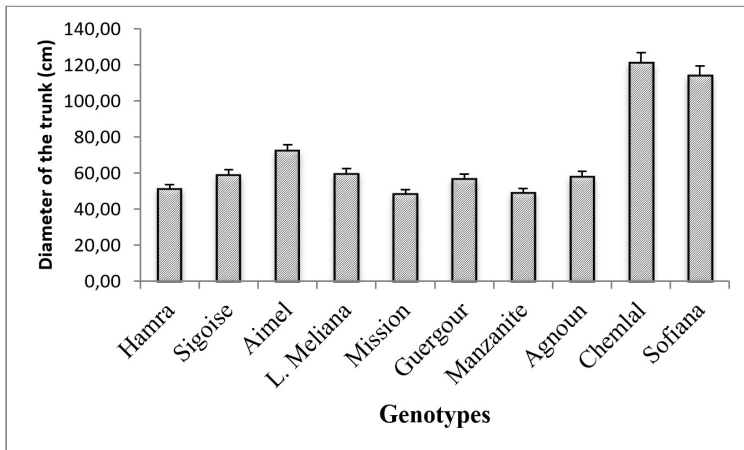


Table 5: Results of the one-way analysis of variance for the trunk diameter character of studied genotypes.

	SS	df	MS	F	p-value
Total genotype	607463.6	1	607463.6	3703.649	0.0000
genotypes	79864.8	9	8873.9	54.103	0.0000

f. The content of chlorophyll pigments.

- i. **Chlorophyll a.** The representation of the chlorophyll content in (figure 6) also varies for the ten genotypes selected. The results of the analysis of variance with one classification criterion (table 6), reveal very highly significant differences ($F = 106.492$ and $p = 0.0000$ at the 5% error threshold) for the varietal effect for the content of chlorophyll a, of the genotypes studied.

Figure 6: Histogram representing chlorophyll a content of the studied varieties.

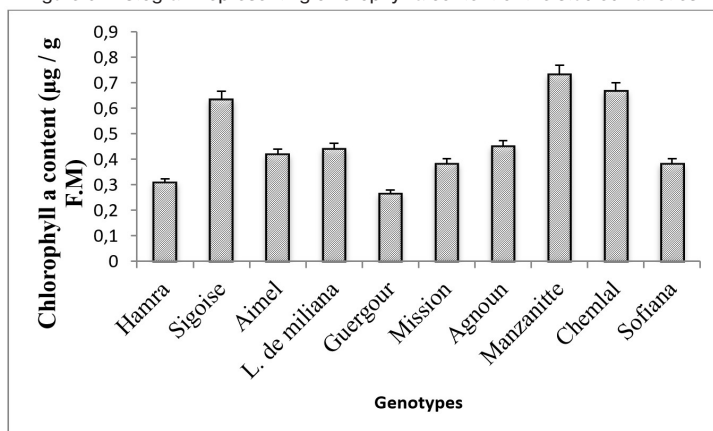


Table 6: Results of the one-way analysis of variance of the chlorophyll a content variable, of studied genotypes.

	SS	df	MS	F	p-value
Total genotype	29.284816	1	29.28482	9771.224	0.0000
genotypes	2.87244	9	0.31916	106.492	0.0000

- ii. **Chlorophyll b.** the graphic representation (figure 7) of the content of chlorophyll b; shows that the ten genotypes studied present variations. The results of the analysis of variance with one classification criterion (table 7), reveal very highly significant differences ($F = 100.357$ and $p = 0.0000$ at the 5% error threshold) for the varietal effect for the content of chlorophyll b, of the genotypes studied.

Figure 7: Histogram representing chlorophyll b content of the studied varieties.

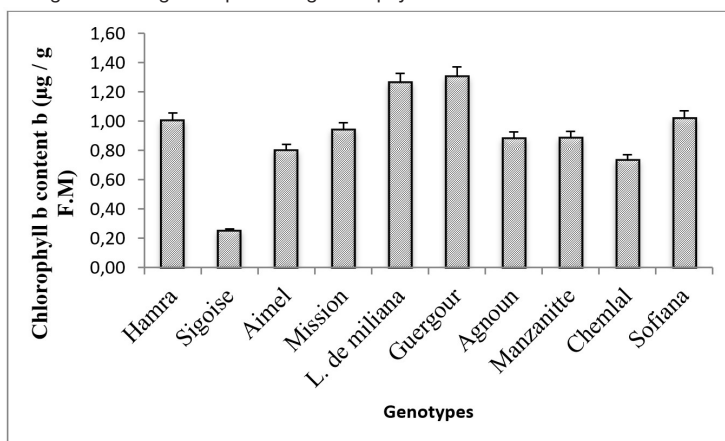


Table 7: Results of the one-way analysis of variance for the chlorophyll b content trait of the studied genotypes.

	SS	df	MS	F	p-value
Total genotype	107.3319	1	107.3319	9457.359	0.0000
genotypes	10.2506	9	1.1390	100.357	0.0000

iii. **Carotenoids.** It is clearly shown in Figure 8 that the carotenoid content of the ten genotypes studied differs. The results of the analysis of variance with one classification criterion (table 7), reveal very highly significant differences ($F = 25.63388$ and $p = 0.0000$ at the 5% error threshold) for the varietal effect for the content of chlorophyll b, of the genotypes studied.

Figure 8: Histogram representing carotenoid content of the studied varieties.

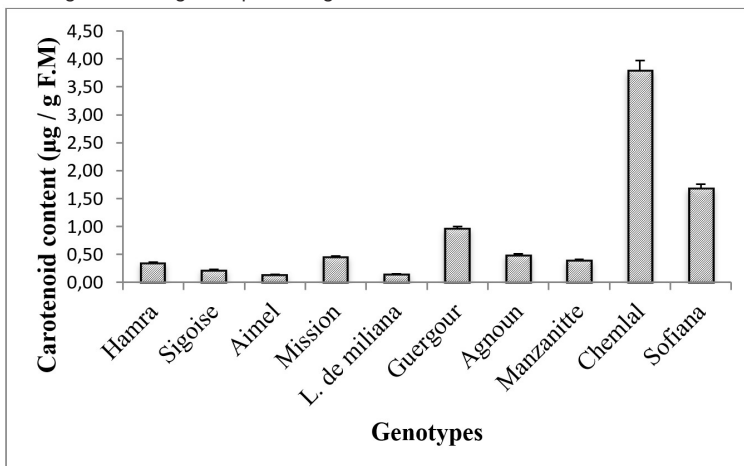


Table 8: Results of the one-way analysis of variance for the chlorophyll b character of the studied genotypes.

	SS	df	MS	F	p-value
Total genotype	1116.248	1	1116.248	44.15517	0.000000
genotypes	5832.249	9	648.028	25.63388	0.000000

g. **Leaf area.** Concerning the leaf area, the data gathered for each genotype in (figure 9) represents variation. The results of the analysis of variance with one classification criterion (tab. 9), reveal a strong influence of the leaf area by the nature of the genotypes tested ($F = 14.392$ and $p = 0.0000$ at the threshold of error 5%).

Figure 9: Histogram representing leaf area of the studied varieties.

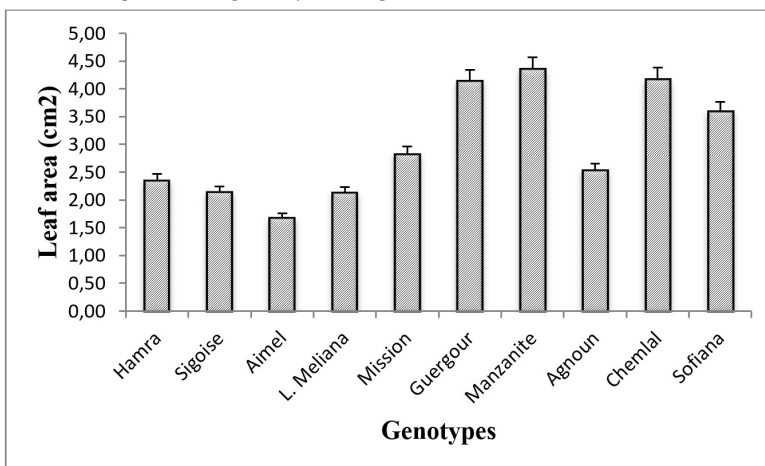


Table 9: Results of the one-way analysis of variance for the leaf area character of the studied genotypes.

	SS	df	MS	F	p-value
Total genotype	1157.357	1	1157.357	1338.625	0.000000
genotypes	111.990	9	12.443	14.392	0.000000

- h. Relative water content.** For the representation of the relative water content in (figure 10); it can be seen that there are also differences for the chosen genotypes. The results of the analysis of variance with one classification criterion (table 10), reveal a strong influence of the Relative Water Content by the nature of the genotypes tested ($F = 31.598$ and $p = 0.0000$ at the threshold error 5%).

Figure 10: Histogram representing relative water content of the studied varieties.

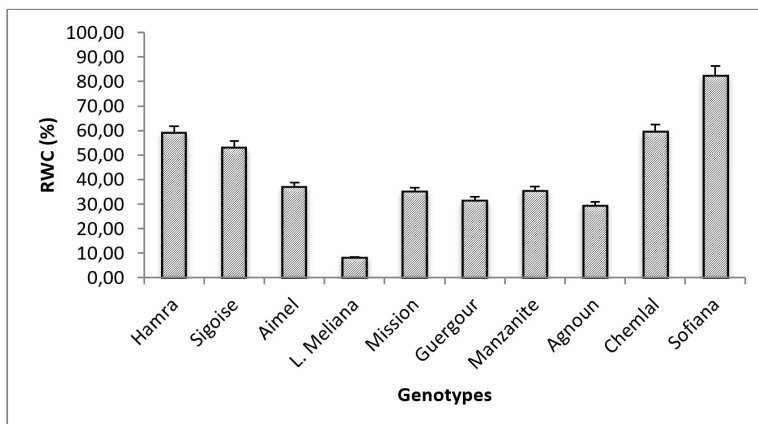


Table 10: Results of the one-way analysis of variance for the Relative Water Content trait of the studied genotypes.

	SS	df	MS	F	p-value
Total genotype	265111.2	1	265111.2	2232.023	0.0000
genotypes	33777.8	9	3753.1	31.598	0.0000

4. DISCUSSION

The comparison of the behavior of plants is made, by a succession of studies at the cellular, sub-cellular and molecular levels which depend on the genetic potentialities of the species which result in morphological and physiological differences determining the specific characteristics of the individual.

This work was carried out on the morphological, physiological and biochemical behavior of a varietal collection of olive trees grown in Algeria in a steppe region, intensively under controlled conditions (irrigation, optimal fertilization and phytosanitary treatment, etc.). The results obtained showed a great variability of the morphological, physiological and biochemical parameters depending on the variety and the tree. The results of the Principal Component Analysis indicate:

1. Study of variables

The main plane is the one formed by axes 1 and 2 on which the maximum information is found (67.22% of the general information). The variables which have the strongest coefficients in absolute value are those which contribute the most to the formation of a given axis and are the most linked to it: the height of the plant, the diameter of the trunk, the relative water content, the height of the canopy the height of the trunk and the circumference of the canopy, contributed the most to the formation of axis 1. Thus, axis 1 is mainly characterized by the variables cited. Examination of the quality of representation identified the following groups: plant height ($r=0.96$), trunk diameter ($r=0.92$), relative water content ($r=0.87\%$), canopy height ($r=0.72$) and trunk height ($r=0.68$). On the other hand, axis 2 is characterized by variables chlorophyll content a and b. Examination of the quality of representation revealed two groups: chlorophyll a ($R=0.85\%$) and chlorophyll b (-0.26%). (Figure. 11).

2. Study of individuals

Although all the varieties are grown under the conditions, it can be noticed that, for the plane formed by axes 1 and 2, representing the varieties studied, that the varieties Chemlal and Sofiana are positively correlated with the axis F1 and the varieties Agnoun, Manzanite, Aimel, Mission, Guergour, Longue de Miliana and Sigoise are negatively

correlated with the same axis F1. This quality of representation informs us about the existence or not of significant differences between the varieties studied.

3. Superposition of variables and individuals:

Axis 1 is characterized by the variables plant height, canopy height, leaf area, relative carotenoid, water content and trunk diameter. The Chemlal and Sofiana individuals are on the right side of axis 1 and have high values of plant height, canopy height, leaf area, relative water content carotenoids and trunk diameter while the individuals and Agnoun, Manzanite, Aimel , Mission, Guergour, Longue de Miliana and Sigoise are to the left of axis 1, which have a low value for these variables. Axis 2, which is characterized by variables chlorophyll a, trunk height, canopy circumference includes, at the top, Agnoun which has the values of canopy circumference, lower trunk height and Hamra at the bottom of the axis 2 with the highest values for these same variables. (Figures 12 and 13).

Figure 11: Correlation circle between variables and factors 1 and 2.

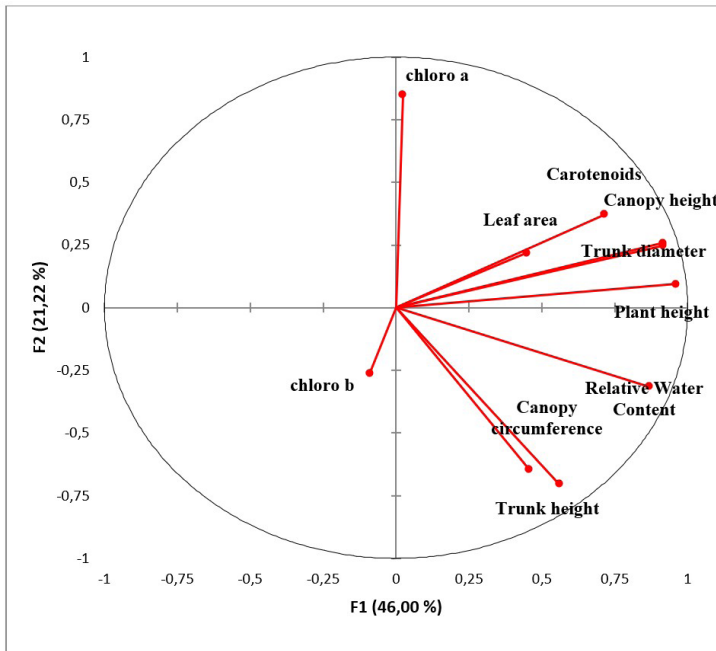


Figure 12: Coordinates of individuals on factors 1 and 2.

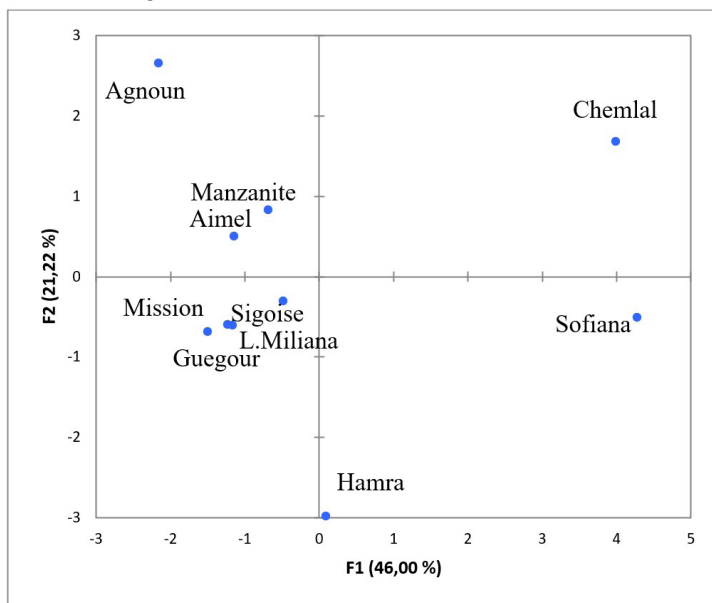
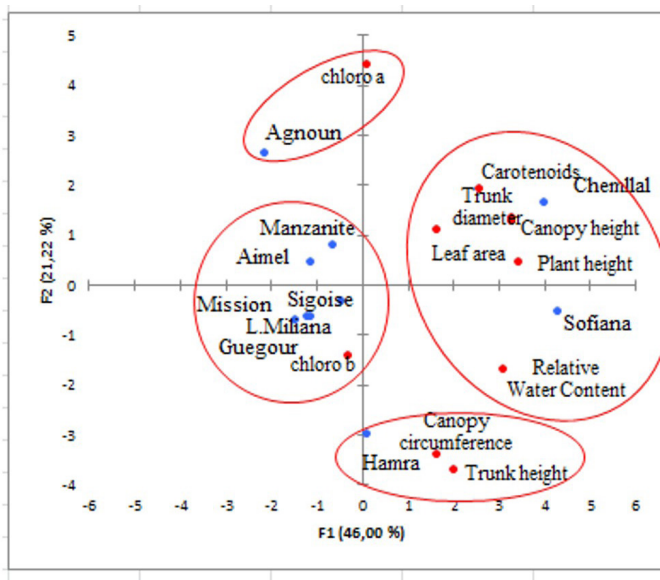


Figure 13: Superposition of variables and individuals on factors 1 and 2.



Indeed, our results show that the development of the tree is influenced by a multitude of endogenous and exogenous factors; in particular, the morphological growth and development in length and width of the plant and trunk, the circumference and height of the canopy, and the secondary growth expansion of the trunk in thickness are related

to the varietal potential (**Aiachi M., and al.; 2009**); Palease A.M., and al.; 2010, **Bamouh A., and al, 2012, Masmoudi-Charfi C., 2012**. However, several factors interfere and make the tree response analysis more complex **Connor D.J., Fereres E., 2005, Fernandez J.E., 2006, Castillo-Llanque F.J., and al., 2005, Castillo-Llanque F.J., 2008, Chehab H., 2007, and Martin-Vertedor A.I., and al. 2011**.

Simultaneous measurements of the biochemical and physiological parameters (chlorophyll pigments and relative water content) of the trees grown under the same growing conditions show that these factors are closely linked to the growth parameters of the tree and are inter-correlated with each other and with the varietal potential (Amouretti, 1985).

Hamra and Agnoun individuals are well represented on axis 2 1 and 4, which provides (21.22%) information. Chemlal, Sofiana, Agnoun, Manzanite, Aimel, Mission, Guergour, Longue de Miliana and Sigoise individuals are well represented on axis one which provides (46.00%) information. It appears, through the two axes, on the one hand that the Chemlal, Sofiana individuals form a group which is characterized by a height of the plant, diameter of the trunk, height of canopy, relative water content and foliar surface, more important, on the other hand, we find the Manzanite, Aimel, Mission, Guergour, Longue de Miliana and Sigoise individuals, which are distinguished by a low value of these variables. On the other hand, that the individual Hamra forms a group which is characterized by high values of the circumference and the height of the trunk unlike the individual Agnoun which is distinguished by low values for the same variables.

The distribution of the classes shows four classes. **The first class**, with higher values, consists of the varieties Chemlal and Sofiana. It forms a group which is characterized by a height of the plant, diameter of the trunk, height of canopy, relative water content and foliar surface. In contrast, **the second class**, with lower values for the same variables, is composed of the varieties Manzanite, Aimel, Mission, Guergour, Longue de Miliana and Sigoise. **The third class** has the highest values (circumference and the height of the trunk) as opposed to the fourth class which includes the Agnoun variety and has low values for the same variables.

5. CONCLUSION

This work is a contribution to the study of phenotypic diversity through the comparison of the morphological and physio-biochemical parameters of ten varieties of olive trees (Hamra, Sigoise, Aimel, Longue de Meliana, Mission, Guergour, Manzanite,

Agnoun, Chemlal and Sofiana) grown under controlled conditions; in a steppe zone with an arid climate and degraded soil in the wilaya of Tiaret commune of Rechaiga.

At the end of this study, which focused on the morphological and physio-biochemical characterization of some varieties of olive trees in a characterized region of arid zone of western Algeria, there is a significant morphological variation for most of them. traits studied. This variability is the result of a biological richness that we consider important. Even under the same conditions, each variety shows its own particularities which are expressed in morphological characters (growth in length, height and diameter of the trunk, canopy volume, leaf surface, etc.) and physio-biochemical (Relative content in water, synthesis of chlorophyll pigments).

The one-factor ANOVA study All the morphological, physiological and biochemical parameters studied without exception show highly significant differences ($p < 0.001$) depending on the variety studied.

The study of the correlations between the variables (figure 11) shows; on the one hand the Relative Water Content is positively correlated with the variables with the height of the plant ($r=0.82$), height of foliage ($r=0.76$), the diameter of the trunk, height ($r=0.71$) and trunk height ($r=0.67$); plant height is positively correlated with canopy height ($r=0.98$), trunk diameter ($r=0.90$) and carotenoid content ($r=0.60$) variables and canopy height with trunk diameter ($r = 0.89$).

The principal component analysis (PCA) allowed us to identify four groups composed of Chemlal and Sofiana form a group which is characterized by plant height, canopy height, leaf area, relative water content, carotenoid content and diameter of the largest trunk, while at the opposite we find the individuals Agnoun, Manzanite, Aimel, Mission, Guergour, Longue de Miliana and Sigoise a third class having the most important values (circumference and height of the trunk) unlike the fourth class with low values for the same variables composed of the Agnoun variety.

These differences in physio-biochemical morphological behavior are probably due to inter-varietal genetic variability or variety-environment interaction.

Given the little work done in the field of the characterization of Algerian varieties, apart from the main denominations (cultivars), then a characterization study of Algerian varieties is necessary.

It is desirable to extend this study to a qualitative and quantitative characterization of the organs (leaf, inflorescence, fruit and kernel), fruit and oil yields in addition to a characterization of the physicochemical properties of their oils.

REFERENCES

- Aïachi-Mezghani, M., Sahli, A., Grati, N., Ben Amar, F., Ben Ali, S., Ben Amor, R., Labidi, F., & Ouled Amor, A. (2009). Olive trees characteristics (*Olea europaea* L.) cultivated under intensive conditions in Tunisia (Sfax site). In For a renovate, profitable and competitive Mediterranean olive growing sector. Olivebioteq 2009, Sfax, Tunisia, 15-19 December 2009, Book of proceedings, 443-447.
- Amouritti, M., & Comet, G. (1985). *Le livre de l'olivier*. Edisud. 76p.
- Angelopoulos, K., Dichio, B., & Xiloyannis, C. (1996). Inhibition of photosynthesis in olive tree (*Olea europaea* L.) during water stress and rewatering. *Journal of Experimental Botany*, 47, 1093-1100.
- Bamouh, A., Ezzahouani, A., & ELhatmi, S. (2012). Les besoins en eau de l'Olivier sur la base de son taux de couverture du sol dans la zone de Béni Mellal. HTE, N° 151, Mars 2012.
- Ben Ahmed, C., Ben Rouina, B., Sensoy, S., Boukhris, M., & Ben Abdallah, F. (2009). Changes in gas exchange, proline accumulation and antioxidative enzyme activities in three olive cultivars under contrasting water availability regimes. *Environmental and Experimental Botany*, 67, 345-352.
- Castillo-Llanque, F.J., Rapoport, H.F., & Navarro, C. (2005). Caracterización de la ramificación del olivo: influencia de diferentes fechas de recolección y estados de carga. In Congreso Iberico de Ciencias Hortícolas, May 2005, Porto, Portugal, 1-7.
- Castillo-Llanque, F.J., Rapoport, H.F., & Navarro, C. (2008). Interaction between shoot growth and reproductive behaviour in olive trees. *Acta Horticulturae*, 791, 453-457.
- Chehab, H. (2007). Etude écophysiological, agronomique, de production et relation source-puits chez l'Olivier de table en rapport avec les besoins en eau (Doctoral thesis). Institut National Agronomique de Tunisie.
- Chevery, J.L. (1995). Planimètre électronique LICOR-3000A: manuel d'utilisation. (À compléter: éditeur, lieu).
- Connor, D.J., & Fereres, E. (2005). The Physiology of Adaptation and yield Expression in Olive. *Horticultural Review*, 31, 155-229.
- FAO (2019). Food and Agricultural Organization. <http://www.fao.org/faostat/fr/#data>
- Fernandez, J.E. (2006). Irrigation Management in Olive. Olivebioteq, Book of Abstracts, 295-305.
- Giorio, P., Sorrentino, G., & d'Andria, R. (1999). Stomatal behaviour, leaf water status and photosynthesis responses in field-grown olive trees under water deficit. *Environmental and Experimental Botany*, 42, 95-104.
- Hadj Sadok, T., Rebiha, K., & Terki, D. (2018). Caractérisation physico-chimique et organoleptique des huiles d'olive vierges de quelques variétés algériennes. *Revue Agrobiologia*, 8(1), 706-718.
- Lazzeri, Y. (2009). Les défis de la mondialisation pour l'oléiculture méditerranéenne, l'olivier en Méditerranée. Centre culturel Français de Tlemcen-Algérie, p. 24.
- Martin-Vertedor, A.I., Perez Rodriguez, J.M., Prieto Losada, M.H., & Fereres Castiel, E. (2011). Interactive responses to water deficits and crop load in olive (*Olea europaea* L., cv. Morisca). I - Growth and water relations. *Agricultural Water Management*, 98, 941-949.

Masmoudi-Charfi, C. (2012). Quantitative analysis of soil water content in young drip irrigated olive orchards. *Advances in Horticultural Sciences*, 26(3-4), 138-147.

Palese, A.M., Nuzzo, V., Favati, F., Pietrafesa, A., Celano, G., & Xiloyannis, C. (2010). Effects of water deficit on the vegetative response, yield and oil quality of olive trees (*Olea europaea* L., cv. Coratina) grown under intensive cultivation. *Scientia Horticulturae*, 125, 222-229.

Philippeau, G. (1986). Comment interpréter les résultats d'une analyse en composantes principales. Collection STAT-ITCF. Paris: ITCF, 63 p.

Pinelli, P., Galardi, C., Mulinacci, N., Vincieri, F.F., Cimato, A., & Romani, A. (2003). Minor polar compounds and fatty acid analyses in monocultivar virgin olive oils from Tuscany. *Food Chemistry*, 80(3), 331-336.

CAPÍTULO 6

EFFECT OF GIBBERELIC ACID AND SILVER NITRATE ON THE GERMINATION OF *PINUS PSEUDOSTROBUS* LINDL.

Data de submissão: 22/05/2026

Data de aceite: 09/06/2026

Diana Gisselle Calderón Mejías

Facultad de Química Farmacéutica Biológica
Universidad Veracruzana
Xalapa-Enríquez, Ver. México
<https://orcid.org/0009-0003-5081-8986>

Dra. Lourdes Georgina Iglesias Andreu¹

Instituto de Biotecnología y Ecología
Aplicada. Universidad Veracruzana
Xalapa-Enríquez, Ver. México
<https://orcid.org/0000-0002-1364-7773>

Mtra. Laura Yasmin Flores López

Instituto de Biotecnología y Ecología
Aplicada. Universidad Veracruzana
Xalapa-Enríquez, Ver. México
<https://orcid.org/0000-0003-0826-2366>

ABSTRACT: *Pinus pseudostrobus* Lindl. is a forest species of great economic importance, but it is in the Red List of Threatened Species, so it is necessary to have effective methods for the massive propagation of its seeds, which have a limited germination capacity. For this reason, it was proposed to carry out the present work to evaluate the effectiveness of the use of different treatments with silver

nitrate (AgNO_3) and gibberellic acid (GA_3) in the *in vitro* germination of seeds of this species. For this purpose, a completely randomized design was established with four replicates and eight treatments ($\text{TG}_1=3\text{mgL}^{-1}\text{GA}_3$, $\text{TG}_2=3\text{mgL}^{-1}\text{GA}_3-50\text{mgL}^{-1}\text{AgNO}_3$, $\text{TG}_3=3\text{mgL}^{-1}\text{GA}_3-75\text{mgL}^{-1}\text{AgNO}_3$, $\text{TG}_4=3\text{mgL}^{-1}\text{GA}_3-100\text{mgL}^{-1}\text{AgNO}_3$, $\text{TG}_5=50\text{mgL}^{-1}\text{AgNO}_3$, $\text{TG}_6=75\text{mgL}^{-1}\text{AgNO}_3$, $\text{TG}_7=100\text{mgL}^{-1}\text{AgNO}_3$, $\text{TG}_8=\text{control}$) on McCown's Woody Plant basal medium, where a total of 256 embryos were seeded. After 2 weeks of culture, the percentage and speed of germination were determined for each treatment, among other germination indices. The results showed that the treatments with AgNO_3 reduced the necrosis, but hurt seed germination, unlike what was observed with treatments TG_1 , TG_2 , and TG_3 with GA_3 , which showed higher percentages (65-69%) than what was observed in the control treatment (48.44%). In conclusion, the use of 3 mg L⁻¹ of GA_3 is useful to increase the germination capacity *in vitro* and enhance the growth of this valuable species.

KEYWORDS: *Pinus*; *in vitro* culture; oxidation; seeds.

1. INTRODUCTION

In forest species, it is common to observe the presence of a strong dormancy or dormancy in their seeds, which allows them to survive and avoid unfavorable environmental

¹ Corresponding author

conditions. The natural germination of *Pinus pseudostrobus* Lindl. can vary significantly according to genetic and environmental variations, such as soil quality, water availability, altitude, and competition with other species. For example, research in the Sierra Norte of Oaxaca, México, has shown that survival and initial growth of *P. pseudostrobus* are closely related to genetic background and site-specific conditions (Viveros-Viveros et al., 2006).

P. pseudostrobus is widely distributed in different biogeographic conditions, mainly in transition zones, from temperate to cold and temperate to warm climates (Sandoval-García et al., 2020). Its use ranges from obtaining resin, sawmilling, plywood, veneer, pulp for paper, packing boxes, and molding to cabinetmaking, handicrafts, and commercial plantations.

For this reason, it is necessary to find adequate ways to cover the great demand for seedlings required by producers for reforestation purposes. One of the techniques that offers a wide variety of tools is in vitro culture, in which different agents are used to promote seed germination. Among these, gibberellic acid (GA_3) and silver nitrate ($AgNO_3$) stand out as valuable substances in priming strategies for the propagation of plant species.

Silver nitrate acts mainly as an inhibitor of ethylene (Zarei, 2023), a phytohormone that can limit germination and is involved in senescence processes. By blocking the effects of ethylene, it enhances cell elongation and senescence (Hernández-Pérez et al., 2023). In addition, it plays a crucial role in regulating essential physiological processes in plants (Isah et al., 2022). When ethylene comes into contact with silver nitrate, they react by releasing carbon dioxide ($2CO_2$), water ($2H_2O$), dinitrogen (N_2), and silver ($2Ag$). The reaction is favorable, not only because it removes ethylene from the media, but also because it releases carbon dioxide, which is useful for seedling photosynthesis, and silver ions. $AgNO_3$ is effective in improving in vitro germination of seeds of species such as *Euphorbia nutans* Lag. (Aguilar-Jiménez et al., 2020). However, there are no recent studies describing the effect of $AgNO_3$ on *Pinus* sp., except for a study conducted on *Pinus taeda* L., in which the objective was to improve crop initiation. However, the differences with other treatments tested were not statistically significant (Pullman et al., 2003).

On the other hand, GA_3 is a plant hormone that acts as a plant growth regulator by playing important roles in seed germination, stem elongation, induction of flowering, and fruit growth (Peng et al., 2020); specifically, it stimulates the enzymatic activity necessary for the mobilization of energy reserves, such as starches, towards developing tissues, which facilitates germination even in seeds that are dormant (Palma Soto et al., 2022). Some studies in pine species, such as *Pinus massoniana* Lamb. and *Pinus wallichiana* A.B.J. Jacks., have shown that GA_3 is useful in improving germination rates by accelerating and increasing germination (Lavania et al., 2007; Guangwu and Xuwen, 2014).

2. MATERIALS AND METHODS

The present study was carried out at the Plant Tissue Culture Laboratory of the Institute of Biotechnology and Applied Ecology (INBIOTECA) of the “Universidad Veracruzana,” located in the city of Xalapa, Veracruz, Mexico.

In 2023, a total of 20-plus trees were selected from a natural population of *P. pseudostrabus* in the municipality of Las Vigas de Ramírez, Veracruz, Mexico. Seeds were collected using the scaling technique, and a seed pool was subsequently created.

350 seeds were randomly selected and subjected to imbibition for 24 hours in sterile distilled water (SDW) in a laminar flow hood. These seeds were then immersed for 3 minutes in a 96% ethanol solution and rinsed with SDW. This procedure was repeated once with each of the following solutions: 75% ethanol, 50% ethanol, and 25% ethanol. Finally, the seeds were immersed in a commercial solution of 25% (v/v) sodium hypochlorite (NaClO) with 0.5 mL of polyoxyethylene (20) sorbitan monolaurate (Tween-20), under constant agitation for 30 minutes (Marín-Martínez e Iglesias-Andreu, 2022).

Seeds were sown in 20 mL in $\frac{1}{2}$ WPM (Woody Plant Medium, Sigma®, Sigma Aldrich, USA) culture medium (McCown, 1981) supplemented with 20 gL⁻¹ sucrose, 4 mgL⁻¹ gibberellic acid (GA₃), 25 mgL⁻¹ hydrochloric cysteine, and 10 mL⁻¹ vitamin solution (Glycine, Myo-Inositol, Nicotinic Acid, Pyridoxine HCl, and Thiamine HCl). Treatment components described in Table 1 were added to each medium. The pH of the culture medium was adjusted to 5.7, and 2.5 gL⁻¹ Phytigel (Sigma®, Sigma Aldrich, USA) was added as a gelling agent. The medium was distributed in 100 mL type “G” glass flasks, which were then sterilized at 1.5 kg·cm⁻² at 120 °C for 15 min (Marín-Martínez e Iglesias-Andreu, 2022).

Table 1. List of treatments used in the germination of *P. pseudostrabus* seeds.

Doses	Treatments							
	GA ₃	3 mgL ⁻¹ de GA ₃ + AgNO ₃			Silver nitrate (AgNO ₃)			Control
	3 mgL ⁻¹	50 mgL ⁻¹	75 mgL ⁻¹	100 mgL ⁻¹	50 mgL ⁻¹	75 mgL ⁻¹	100 mgL ⁻¹	
Abbreviatures	TG ₁	TG ₂	TG ₃	TG ₄	TG ₅	TG ₆	TG ₇	TG ₈

In the laminar flow hood, the embryo was manually removed from the endosperm of each seed with the help of a scalpel and forceps. These embryos were then seeded in sterile flasks containing 20 mL of culture medium (four embryos/flask). The cultures were

incubated under fluorescent light conditions (24 hours/day) at a 25 ± 2 °C temperature. The germination process was evaluated 24 hours after sowing, and the following germination indexes were obtained: germination percentage, percentage of inactivated embryos, maximum germination, germination index, germination speed, and peak value.

Germination (G). Germination percentage was calculated according to the methodology of Tan et al. (2017):

$$\%G = \frac{G_f}{n} \times 100$$

Where:

- %G germination percentage.
- Gf number of germinated embryos.
- n number of embryos that were seeded.

Non-viable embryos (NVE). Percentage of non-viable obtained by subtracting %G from the maximum percentage, i.e., 100%.

Maximum germination (MG). Day on which an increase in the number of germinated embryos was observed during the germination process.

Germination index (IG). The germination index was calculated according to the formula proposed by (Scott et al., 1984):

$$IG = \frac{\sum T_i N_i}{S}$$

Where:

- IG is the germination index.
- T_i is the number of days after sowing.
- N_i is the number of embryos germinated on day i.
- S is the total number of embryos sown.

This germination parameter provides a measure of germination time in relation to germination capacity (Gonzalez and Orozco, 1996). Smaller values of the germination index generally indicate a shorter germination time (Scott et al., 1984).

Germination rate (GR). It was determined according to the formula proposed by Maguire (1962):

$$M = \sum \frac{n_i}{t}$$

Where:

- M is the germination speed.
- ni is the number of embryos germinated on day i.
- t is the germination time from sowing to germination of the last seed.

This germination index shows the ratio of the number of germinated seeds to the germination time. In conclusion, it offers a very simple method to evaluate seedling emergence and/or germination treatments, if any (Maguire, 1962; González and Orozco, 1996).

Peak value (PV; percentage per day). It was determined as the maximum value of the sum of the germination percentage divided by the number of days in which germination occurred. This was determined according to (Kolotelo et al., 2001).

Growth and phenolization of germinated seedlings were also evaluated 30 days after planting. For growth, the length of the seedlings was measured from the root to the tip of the needles using a ruler. For phenolization, the number of phenolized seedlings was recorded on day 30, considering the appearance of necrosis in at least 50% of the leaf tissue. The data obtained were processed by analysis of variance in Jamovi 2.5.6.

3. RESULTS AND DISCUSSIONS

The results of the germination indices obtained during two weeks showed the existence of differences between the treatments evaluated (Table 2).

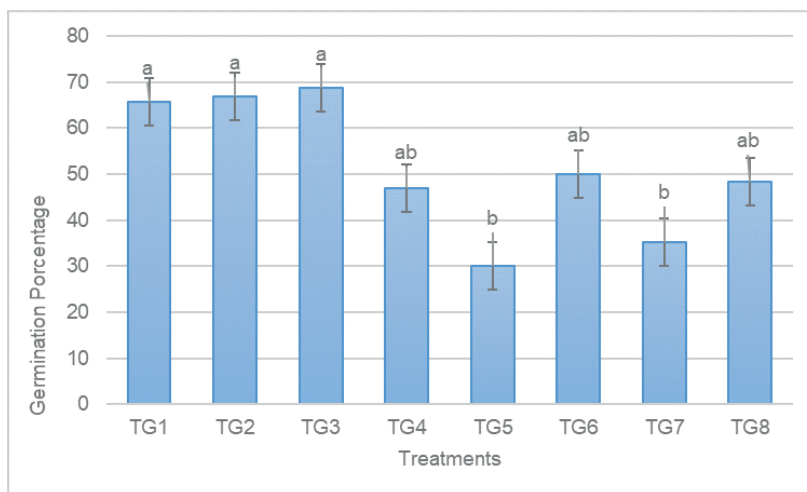
Table 2. Effect of treatments on the germination index of *P. pseudostrubus* seeds.

Treatments	VEG (%)	NVE (%)	MG (days)	GI	GR	PV
TG ₁	65,63	34,37	9	25,56	0,61	7,29
TG ₂	66,80	40,62	6	9,34	0,45	9,89
TG ₃	68,75	31,25	9	27,28	0,66	7,63
TG ₄	46,88	53,12	5	4,25	0,26	9,37
TG ₅	30,08	78,12	11	10,5	0,16	1,98
TG ₆	50,00	50	11	27,81	0,46	4,54
TG ₇	35,16	71,87	11	15,40	0,25	2,55
TG ₈	48,44	59,37	8	10,48	0,30	4,9

VEG: Viable embryos germinated; NVE: Non-viable embryos; MG: Maximum germination; GI: Germination index; GR: Germination rate; PV: Peak value; TG₁=3mgL⁻¹GA₃, TG₂=3mgL⁻¹GA₃-50mgL⁻¹AgNO₃, TG₃=3mgL⁻¹GA₃-75mgL⁻¹AgNO₃, TG₄=3mgL⁻¹GA₃-100mgL⁻¹AgNO₃, TG₅=50mgL⁻¹AgNO₃, TG₆=75mgL⁻¹AgNO₃, TG₇=100mgL⁻¹AgNO₃, TG₈=control.

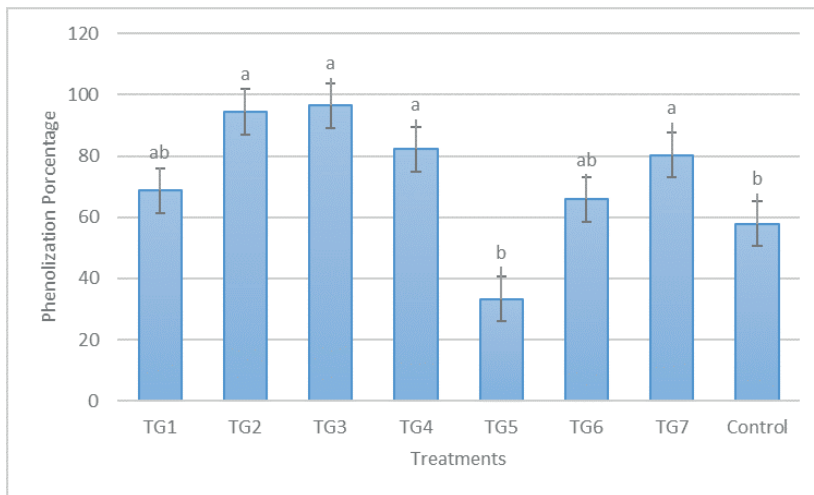
As expected, the embryos extracted from the seeds germinated more quickly due to the absence of seed coats; therefore, they did not encounter inhibitors such as abscisic acid (ABA) that are typically present in the seed. In most treatments, the presence of germinated embryos was observed from the third day; however, significant differences in germination speed were detected. Treatment TG₃ showed the highest germination values (68.75%), significantly higher than those observed in the control treatment. However, this treatment did not differ considerably from the germination percentage detected in treatments TG₁ and TG₂, so these treatments are equally effective in achieving high germination percentages in this species (Fig. 1).

Fig. 1. Effect of the treatments evaluated on the percentage of germination of *P. pseudostrubus* seeds. Different letters indicate a statistical difference among treatments according to Tukey's test ($p < 0.05$). TG₁=3mgL⁻¹GA₃, TG₂=3mgL⁻¹GA₃-50mgL⁻¹AgNO₃, TG₃=3mgL⁻¹GA₃-75mgL⁻¹AgNO₃, TG₄=3mgL⁻¹GA₃-100mgL⁻¹AgNO₃, TG₅=50mgL⁻¹AgNO₃, TG₆=75mgL⁻¹AgNO₃, TG₇=100mgL⁻¹AgNO₃, TG₈=control.



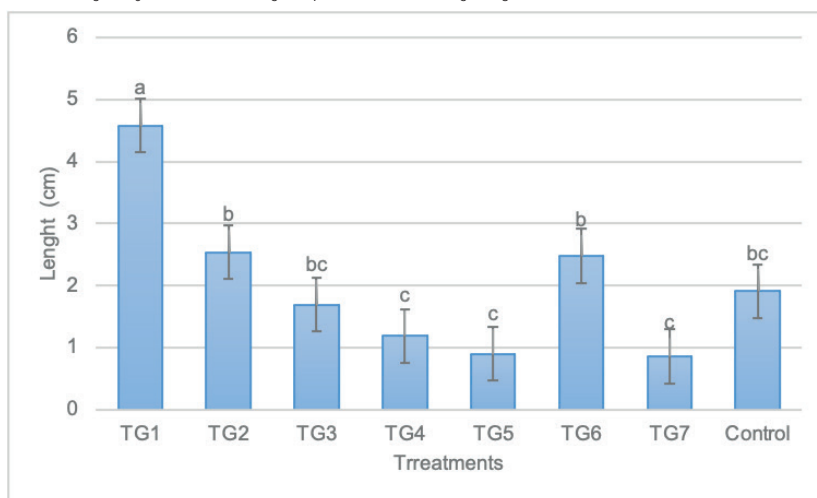
The results of the treatment effects on phenolization and elongation of germinated seedlings 30 days after cultivation showed that phenolization was lower in treatments containing AgNO₃. However, the number of seedlings showing symptoms of tissue necrosis was higher in treatments containing a combination of both treatments; it was even higher than in the treatment containing only GA₃ (Fig. 2).

Fig. 2. Effect of different treatments on the phenolization percentage of *P. pseudostrobis* seedlings 30 days after germination. Different letters indicate a statistical difference among treatments according to Tukey's test ($p < 0.05$). TG₁=3mgL⁻¹GA₃, TG₂=3mgL⁻¹GA₃-50mgL⁻¹AgNO₃, TG₃=3mgL⁻¹GA₃-75mgL⁻¹AgNO₃, TG₄=3mgL⁻¹GA₃-100mgL⁻¹AgNO₃, TG₅=50mgL⁻¹AgNO₃, TG₆=75mgL⁻¹AgNO₃, TG₇=100mgL⁻¹AgNO₃, TG₈=control.



Regarding the effect of these compounds on seedling growth (Fig. 3), it was found that the TG₁ treatment was superior in that it led to the formation of seedlings with greater length. This demonstrates that GA₃ is effective not only in stimulating germination but also in promoting growth (Suarez-Padrón, 2020).

Fig. 3. Effect of the treatments evaluated on the average length of *P. pseudostrobis* seedlings after 30 days of germination. Different letters indicate a statistical difference among treatments according to Tukey's test ($p < 0.05$). TG₁=3mgL⁻¹GA₃, TG₂=3mgL⁻¹GA₃-50mgL⁻¹AgNO₃, TG₃=3mgL⁻¹GA₃-75mgL⁻¹AgNO₃, TG₄=3mgL⁻¹GA₃-100mgL⁻¹AgNO₃, TG₅=50mgL⁻¹AgNO₃, TG₆=75mgL⁻¹AgNO₃, TG₇=100mgL⁻¹AgNO₃, TG₈=control.



GA₃ application can be applied before sowing by immersion in solution for a certain time, which allows it to be considered a priming treatment; however, when it is incorporated directly into the culture medium, it is classified more as an *in vitro* treatment. In both cases, GA₃ plays a crucial role in improving plant growth and development (Nikam, 2009; Kanjevac, 2023). In this case, GA₃ was incorporated directly into the culture medium during seedling growth. The results obtained in this study agree with those obtained in *Pinus massoniana* Lamb by Zhao-Guangwu (2008), who observed that exogenous GA₃ improves seed germination and seedling vigor by promoting seed respiration and/or reducing the level of ABA. This stimulates the biosynthesis of indole-3-acetic acid (IAA) and gibberellic acid (GA₃). In general, the increase in germination observed in the GA₃ treatments evaluated may be associated with an increase in reactive oxygen species (ROS), which play a key role in cell signaling and reserve mobilization. GA₃ has been reported to stimulate the activity of antioxidant enzymes such as superoxide dismutase (SOD) and catalase (CAT) (Yamaguchi, 2008), allowing a favorable redox homeostasis for germination. Additionally, treatment with GA₃ was able to counteract the effects of ABA by promoting the synthesis of hydrolytic enzymes that mobilize energy reserves, thus facilitating germination. Moreover, since GA₃ contributes to regulating stomatal aperture, its positive effect on seedling elongation could be related to increased gas exchange and improved tissue hydration.

The results from the treatments using silver nitrate were less favorable in comparison. Ethylene inhibition caused by AgNO₃ may have disrupted cell homeostasis, which could explain the increased occurrence of necrosis observed in some treatments that included this compound. Additionally, the application of AgNO₃ may induce oxidative stress in plant cells. While this effect has primarily been documented in studies involving silver nanoparticles – where it has been shown that these nanoparticles can generate reactive oxygen species that negatively impact cell viability (del Rocío Coutiño et al., 2017) – it is plausible that AgNO₃ could also contribute to oxidative stress, thereby affecting cell viability and leading to necrosis in treated tissues.

The use of GA₃ in *in vitro* cultivation studies presents greater advantages for plant growth and development compared to AgNO₃. GA₃, as a phytohormone, stimulates fundamental processes for successful plant establishment, including germination, cell elongation, reserve mobilization, and the promotion of vigorous shoots. These effects are essential in the early stages of *in vitro* development, where plants, especially forest species such as *Pinus* spp., require rapid and balanced growth. On the other hand, although AgNO₃ acts as an ethylene inhibitor, helping to reduce senescence and prolong

tissue viability (Isah et al., 2022), its effect, as observed in this study, turns out to be more limited in the processes evaluated.

4. CONCLUSIONS

The use of silver nitrate (AgNO_3) may be beneficial in studies related to morphogenetic induction, particularly to counteract the adverse effects of ethylene. However, to date, no studies have specifically investigated its effectiveness in alleviating the negative impact of ethylene on pine species. Research on AgNO_3 as an ethylene inhibitor has primarily focused on other plant species rather than those of forestry significance. The results from the current study indicate that while AgNO_3 is effective in inhibiting ethylene, its impact on germination and morphogenesis is detrimental. Therefore, using GA_3 at the evaluated concentrations proves beneficial for improving the germination and growth of *in vitro* seedlings. This can help meet the growing demand for quality propagules of valuable forest species.

REFERENCES

- Aguilar-Jiménez, D., & Rodríguez-De-la-O, J. L. (2020). Efecto de nitrato de plata en la germinación *in vitro* de *Euphorbia nutans* Lag. *Biotecnología Vegetal*, 20(4), 338–350.
- Bashir, M. A., Silvestri, C., Salimonti, A., Rugini, E., Cristofori, V., & Zelasco, S. (2022). Can ethylene inhibitors enhance the success of olive somatic embryogenesis? *Plants*, 11(2), 168. <https://doi.org/10.3390/plants11020168>
- Del Rocio Coutiño, E. M., Ávila Lagunes, L., & Arroyo Helguera, O. (2017). Las nanopartículas de plata: mecanismos de entrada, toxicidad y estrés oxidativo. *Revista de Educación Bioquímica*, 36(2), 39–54.
- González-Zertuche, L., & Orozco-Segovia, A. (1996). Métodos de análisis de datos en la germinación de semillas, un ejemplo: *Manfreda brachystachya*. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 58(1), 15–30. <https://doi.org/10.17129/botsoci.1484>
- Zhao, G., & Jiang, X. (2014). Roles of gibberellin and auxin in promoting seed germination and seedling vigor in *Pinus massoniana*. *Forest Science*, 60(2), 367–373. <https://doi.org/10.5849/forsci.12-143>
- Hernández-Pérez, M. M., Posada-Pérez, L., Barbón, R., Gómez-Kosky, R., Padrón, Y., & La O, M. (2023). Efecto del nitrato de plata (AgNO_3) en el crecimiento *in vitro* de brotes de *Anthurium magnificum* Linden. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 25(2), 88–96. <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v25n2.110056>
- Isah, T., Qurratul, & Umar, S. (2022). Influence of silver nitrate and copper sulfate on somatic embryogenesis, shoot morphogenesis, multiplication, and associated physiological biochemical changes in *Gladiolus hybridus* L. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 149(3), 563–587. <https://doi.org/10.1007/s11240-022-02309-1>
- Kanjevac, M., Bojović, B., Ćirić, A., Stanković, M., & Jakovljević, D. (2022). Seed priming improves biochemical and physiological performance of wheat seedlings under low-temperature conditions. *Agriculture*, 13(1), 2. <https://doi.org/10.3390/agriculture13010002>

- Kolotelo, D., van Steenis, E., Peterson, M., Bennett, R., Trotter, D., & Dennis, J. (2001). *Seed handling guidebook*. British Columbia Ministry of Forests, Tree Improvement Branch.
- Lavana, S. K., Singh, R. P., & Singh, V. (2006). Effect of gibberellic acid and pH on seed germination in blue pine (*Pinus wallichiana*, A. B. Jacks). *Indian Forester*, 132(8), 1024–1028.
- Maguire, J. D. (1962). Speed of germination – Aid in selection and evaluation for seedling emergence and vigor. *Crop Science*, 2(2), 176–177. <https://doi.org/10.2135/cropsci1962.0011183X000200020033x>
- Marín-Martínez, L. A., & Iglesias-Andreu, L. G. (2022). Effect of LED lights on the *in vitro* growth of *Pinus pseudostrobus* Lindl. plants. *Journal of Forest Science*, 68(8), 311–317. <https://doi.org/10.17221/43/2022-JFS>
- McCown, B. H. & Lloyd, G. (1981). Woody plant medium (WPM) – A mineral nutrient formulation for microculture of woody plant species. *HortScience*, 16, 453.
- Nikam, T. D., & Barmukh, R. B. (2009). GA3 enhances *in vitro* seed germination in *Santalum album*. *Seed Science and Technology*, 37(2), 276–280. <https://doi.org/10.15258/sst.2009.37.2.02>
- Palma-Soto, J. A., Parra-Acosta, H., & Orduño-Cruz, N. (2022). Análisis del ácido giberélico desde la cartografía conceptual con enfoque bioético y sustentable. *Acta Universitaria*, 32, e3420. <https://doi.org/10.15174/au.2022.3420>
- Peng, X. L., Zhao, W. J., Wang, Y. S., Dai, K. L., Cen, Y. K., Liu, Z. Q., & Zheng, Y. G. (2020). Enhancement of gibberellic acid production from *Fusarium fujikuroi* by mutation breeding and glycerol addition. *3 Biotech*, 10, 312. <https://doi.org/10.1007/s13205-020-02303-4>
- Pullman, G. S., Namjoshi, K., & Zhang, Y. (2003). Somatic embryogenesis in loblolly pine (*Pinus taeda* L.): Improving culture initiation with abscisic acid and silver nitrate. *Plant Cell Reports*, 22(2), 85–95. <https://doi.org/10.1007/s00299-003-0673-y>
- Sandoval-García, R., González-Cubas, R., & Bautista-Cruz, A. (2020). Asociación ecológica de *Pinus pseudostrobus* (Pinaceae) como respuesta de las variaciones biogeográficas en el Centro-Sur de México. *Acta Botánica Mexicana*, 127, e1627. <https://doi.org/10.21829/abm127.2020.1627>
- Scott, S. J., Jones, R. A., & Williams, W. A. (1984). Review of data analysis methods for seed germination. *Crop Science*, 24(6), 1192–1199. <https://doi.org/10.2135/cropsci1984.0011183X002400060043x>
- Suarez Padrón, I. E., Pérez Meza, P. M., & López Díaz, C. M. (2020). Evaluación de sacarosa y GA3 en un cultivo *in vitro* de brotes de *Alpinia purpurata* (Zingiberaceae). *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 21(2), e1193. https://doi.org/10.21930/rcta.vol21_num2_art:1193
- Tan, M., Liao, F., Hou, L., Wang, J., Wei, L., Jian, H., Xu, X., Li, J., & Liu, L. (2017). Genome-wide association analysis of seed germination percentage and germination index in *Brassica napus* L. under salt and drought stresses. *Euphytica*, 213, 40. <https://doi.org/10.1007/s10681-016-1832-x>
- Viveros-Viveros, H., Sáenz-Romero, C., Vargas-Hernández, J. J., & López-Upton, J. (2006). Variación entre procedencias de *Pinus pseudostrobus* establecidas en dos sitios en Michoacán, México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 29(2), 121–126. <https://doi.org/10.35196/rfm.2006.2.121>
- Yamaguchi, S. (2008). Gibberellin metabolism and its regulation. *Annual Review of Plant Biology*, 59, 225–251. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.59.032607.092804>
- Zarei, S., & Ehsanpour, A. A. (2023). Ethylene inhibition with silver nitrate (AgNO₃) and pyrazinamide (PZA) ameliorates *in vitro* salt tolerance of tomato (*Lycopersicon esculentum* L.) plantlets. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 154(2), 239–247. <https://doi.org/10.1007/s11240-023-02511-9>

CAPÍTULO 7

DESARROLLO DE HABILIDADES DIGITALES EN LA AGRICULTURA 4.0: OPORTUNIDADES PARA AMÉRICA LATINA

Data de submissão: 05/05/2026

Data de aceite: 22/05/2026

Lourdes Mateos-Espejel

Facultad de Trabajo Social,

Sociología y Psicología

Universidad Autónoma de Tlaxcala

Tlaxcala, México

<https://orcid.org/0000-0002-6969-7841>

RESUMEN: El objetivo de este trabajo es reconceptualizar el modelo de adopción de innovaciones propuesto por Rogers (2003) al considerar a las habilidades digitales como elementos del proceso de difusión de innovaciones de tecnologías pertenecientes a la Agricultura 4.0 como la Inteligencia Artificial [IA] y la Agricultura de Precisión [AP] por parte de agricultores que viven en países en desarrollo. Se considera a este tipo de países por la prominencia de las tecnologías mencionadas en países desarrollados y por la desventaja que genera para los países en desarrollo. Si bien la investigación (Bolfé et al., 2020) ha demostrado que los agricultores de países en desarrollo emplean tecnologías como el internet o aplicaciones móviles, el uso de tecnologías pertenecientes a la Agricultura 4.0 es muy bajo, tanto por la falta o básica estructura de Tecnologías de

Información, como por desconocimiento. Y, aunque las limitantes existen, iniciar desde la parte teórica es un primer paso. De esta forma, la metodología empleada consiste en una revisión integradora de la literatura, en la que se identifica un marco conceptual de los conceptos base, se desarrolla una revisión crítica de los conceptos base y se construye una nueva perspectiva a partir de lo previamente establecido. El resultado y principal contribución es la reconceptualización del modelo de adopción de innovaciones de Rogers (2003) que incorpora el desarrollo de habilidades digitales en la primera etapa del modelo, correspondiente al conocimiento de la innovación; es decir, el momento en que una persona aprende acerca de la innovación y busca información sobre la misma. Finalmente se propone a la comunicación de la ciencia, previo análisis de factibilidad, como un elemento inicial para el desarrollo de habilidades digitales en la agricultura.

PALABRAS CLAVE: agricultura; difusión; innovaciones; inteligencia artificial; precisión.

DEVELOPMENT OF DIGITAL SKILLS IN AGRICULTURE 4.0: OPPORTUNITIES FOR LATIN AMERICA

ABSTRACT: The objective of this work is to reconceptualize the Innovation Adoption Model proposed by Rogers (2003) by considering digital skills as elements in the diffusion process of Agriculture 4.0 technologies, such

as Artificial Intelligence [AI] and Precision Agriculture [PA] by farmers living in developing countries. These countries are considered due to the prominence of these technologies in developed countries and disadvantage for developing nations. While research (Bolfe et al., 2020) has shown that farmers in developing countries use technologies such as the internet and mobile applications. However, adoption of Agriculture 4.0 technologies is very low due to a lack of or basic Information Technology infrastructure and a lack of awareness. Although these limitations exist, starting from a theoretical framework is the first step. The methodology employed consists of an integrative literature review in which a conceptual framework of the core concepts is identified. A critical review of these core concepts is developed. And a new perspective is constructed based on what has been previously established. The result and main contribution is reconceptualization of Rogers' (2003) Innovation Adoption Model, which incorporates the development of digital skills into the first stage of the model, corresponding to knowledge of the innovation. It is the moment when a person learns about the innovation and seeks information about it. Finally, science communication is proposed as an initial element for the development of digital skills in agriculture.

KEYWORDS: agriculture; diffusion; innovations; artificial intelligence; precision.

1. INTRODUCCIÓN

El sector de la agricultura a nivel mundial enfrenta múltiples retos, uno de ellos es el rápido crecimiento de la población. El Departamento para los Asuntos Económicos y Sociales Organización de las Naciones Unidas (2019) proyecta que para el año 2050 la cifra de habitantes ascenderá 8 mil 500 millones, lo que significa un crecimiento significativo de la demanda de alimentos. Al mismo tiempo, la disponibilidad de los recursos naturales, como el agua, y la productividad de los cultivos actualmente disminuye constantemente. Aunado a esto, la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura). 2010. Indica que existen 821 millones de personas que sufren de hambre.

De esta forma, la agricultura es un sector fundamental para enfrentar los retos mencionados, que ha vivido una revolución digital, sobre todo en los países desarrollados. Esta revolución también llamada Agricultura 4.0, integra robots, sensores remotos, satélites, datos masivos, cadenas en bloque o *blockchains* en inglés (Grupo ETC, 2019), además de conducir a la creación de sistemas altamente productivos, que anticipan y se adaptan a los cambios que ocasiona el cambio climático, aspecto que contribuye a la seguridad alimentaria, sustentabilidad y estabilidad del ingreso (Trendovov et al., 2019).

Aunque pareciera que la Agricultura 4.0 únicamente trae consigo beneficios, existen perspectivas encontradas que indican que la revolución digital puede desaparecer a las redes campesinas (Grupo ETC, 2019), así como la posible transformación de la agricultura en comunidades ancestrales, con un arraigo muy fuerte a la tierra y una visión del planeta como un ser vivo (Revista de Innovación Educativa, 2020). La Editorial de la

revista indexada *Innovación Educativa* (2020) advierte que el sector de la agricultura en los países desarrollados será impactado de manera contundente por la digitalización de procesos productivos y cadenas de valor a cargo de corporativos internacionales de la agroindustria en áreas como

preparación de las tierras de cultivo, la programación genética de semillas, la maquinaria robotizada de cultivo, el monitoreo en línea de su crecimiento y cosecha, la reacción de los vegetales al entorno ecológico y ambiental, hasta su distribución y consumo, desde una perspectiva capitalista mundial (p.6).

Ante este contexto, resulta fundamental iniciar la discusión teórica sobre las oportunidades que existen para los pequeños agricultores frente al avance de la Agricultura 4.0. Por esta razón, el presente trabajo se inserta en los estudios de adopción de innovaciones de tecnologías pertenecientes a la Agricultura 4.0, como la IA y la AP. La intención es iniciar un camino desde la teoría para afrontar la realidad digital que el campo y sobre todo los pequeños productores están por vivir.

De esta forma, la hipótesis de trabajo parte de la necesidad de iniciar la gestión del proceso de adopción de tecnologías pertenecientes a la Agricultura 4.0, tales como como la IA y la AP, a partir del desarrollo de las habilidades digitales en los agricultores. Si bien existen limitantes como el acceso a internet, falta de infraestructura de Tecnologías de Información y Comunicaciones (TIC) e incluso bajos niveles educativos en el sector rural de países en desarrollo, es preponderante iniciar una discusión teórica que brinde un horizonte para los pequeños productores, quienes están viviendo la inminente proliferación de la Agricultura 4.0 en sus tierras, como sucede en América Latina.

Así, el objetivo es reconceptualizar el modelo de adopción de innovaciones propuesto por Rogers (2003) a través de integrar al desarrollo de las habilidades digitales como un elemento esencial del proceso de difusión de innovaciones de tecnologías pertenecientes a la Agricultura 4.0, tales como la IA y la AP por parte de agricultores que viven en países en desarrollo, específicamente de América Latina, lo cual representa la principal contribución de este trabajo a la literatura existente.

El trabajo está dividido en cuatro apartados, el primero aborda las consideraciones metodológicas que rigen la estructura y bases del análisis a seguir, el segundo abarca el marco teórico de los conceptos empleados, el tercero incorpora el análisis crítico de los conceptos, así como propuesta teórica, y el quinto las conclusiones y futuras investigaciones.

2. CONSIDERACIONES METODOLÓGICAS

La metodología empleada es una revisión integradora de la literatura, la cual es una forma distintiva de investigación que genera nuevo conocimiento acerca de un tema,

debido a que revisa, critica y sintetiza la literatura más representativa sobre el mismo (Snyder, 2019, 335 y 336). De tal forma, es posible construir nuevas perspectivas y reconceptualizar temas que previamente habían sido abordados (Guirao, 2015, Torrance, 2016, Wittermore y Knafl, 2005).

Los pasos para llevar a cabo este trabajo se basaron en una investigación exploratoria que condujera en principio a identificar el marco conceptual de la Agricultura 4.0 específicamente la AI, AP y Proceso de Difusión de Innovaciones de Rogers (2003). Cumpliendo así, el punto sobre las visiones generales sobre los conocimientos base, el cual es necesario en la metodología de la revisión integradora de la literatura. El segundo paso consistió en establecer la relación conceptual entre el Proceso de Difusión de Innovaciones de Rogers (2003), la IA y AP. Aspecto que cumple con el segundo paso de la metodología propuesta, respecto a desarrollar una revisión crítica.

Una vez determinada la revisión crítica, se procedió a reconceptualizar el modelo de Rogers (2003) al integrar las habilidades digitales dentro de la primera etapa del proceso de difusión, correspondiente al conocimiento de la innovación. Este procedimiento conduce a cumplir con el último paso de la metodología propuesta referente a construir nuevas perspectivas sobre lo previamente establecido, ya que en la literatura ha sido escasamente abordada esta relación, lo que conduce a generar conclusiones que reconceptualizan a la agricultura de precisión desde el proceso de adopción.

Para asegurar el rigor de la metodología antes descrita, a continuación, se explica de manera detallada el establecimiento de la muestra, los términos y bases de datos empleadas, así como el criterio de inclusión y exclusión para determinar las fuentes primarias relevantes (Wittermore y Kanfl, 2005: 549).

El objetivo de la fase de muestro de este estudio consistió en identificar investigaciones empíricas y teóricas publicadas sobre los conceptos sobre AP y Adopción de Innovaciones. Varias técnicas se emplearon para identificar investigaciones relevantes. En primer lugar, se realizó la búsqueda de las palabras clave “Agricultura de Precisión” y “Adopción de Innovaciones” en las bases de datos Emerald publishing, Sage, Science Direct, Springer, y Taylor Francis. Sólo se consideraron artículos y libros que incluyeran en el título las palabras claves mencionadas de 2015 a 2020.

En principio se encontraron 46,816 documentos para Agricultura de Precisión y 42, 779 para Adopción de Innovaciones. Sin embargo, para demostrar la afirmación de nuestra hipótesis, fue necesario realizar un análisis minucioso de artículos que privilegiaran la integración de los conceptos de Inteligencia Artificial con la Agricultura de Precisión, así como la relación entre Agricultura de Precisión y Adopción de innovaciones, además

de casos de estudio e investigaciones de corte empírico, lo que derivó en una muestra de 1,055 documentos.

Con esta base se seleccionaron los artículos que en su título incluyeran los conceptos Agricultura de Precisión y Adopción de Innovaciones artículos citados sobre las definiciones de los conceptos, casos de estudio e informes, lo que derivó en una muestra final de 100 artículos, capítulos de libros e informes.

3. MARCO TEÓRICO DE LOS CONCEPTOS BASE

La FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura) 2020. define a la Agricultura 4.0 como una serie de innovaciones que tienen el objetivo de producir productos agrícolas, y está constituida por tecnologías como la AP, el Internet de las Cosas y el Manejo de Datos para optimizar calidad de los productos, así como la eficiencia de la producción; minimizar el impacto ambiental, y riesgos asociados a la producción.

No obstante, Klerkx y Rose (2020) refieren que el concepto aún sigue siendo un término vago y pobre **más relacionado con las ideas de la Industria 4.0, Cuarta Revolución Industrial (Zambon et al. 2019) o Manufactura Inteligente¹**, pero que **sí posee** el potencial para impactar en el diseño y operación de los sistemas de producción, cambiar las funciones de las cadenas de abastecimiento agrícolas, conformar un nuevo tipo de productos por parte industria de alimentos, redefinir las ventas que realizan los vendedores al detalle y la forma en que compran los consumidores finales. En sí, la Agricultura 4.0 es disruptiva y transformativa. La Tabla 1 indica la variedad de tecnologías que conforman la Agricultura 4.0.

Tabla 1. Lista de términos relacionados con la Agricultura 4.0.

Tecnología	Definición
Sensores remotos	Es la ciencia de obtener información acerca de objetos o áreas a la distancia a partir de satélites o naves aéreas. Permite la obtención de imágenes en diferentes longitudes de onda del espectro de luz por activación de sensores.
Cadenas en Bloque - <i>Blockchain</i> en inglés	Sistema en el que una lista creciente de registros o bloques se vinculan entre sí al emplear la criptografía. Cada bloque contiene un resumen criptográfico del bloque previo, una marca de tiempo y datos de transacción.
IoT (Internet de las cosas)	Red de infraestructura global donde los objetos físicos o virtuales con identidades únicas son descubiertos e integrados de forma similar en una red de información asociada donde estas identidades son capaces de ofrecer y recibir servicios que son elementos de procesos de negocios definidos en el ambiente en donde se convierten como activos.

¹El concepto se refiere a la introducción de las tecnologías digitales en la industria de la fabricación, tales como “el internet de las cosas, cómputo móvil, la nube, el big data, redes de sensores inalámbricos, sistemas embebidos y dispositivos móviles” (Ynzunza et al., 2017)

Agricultura de Precisión	Concepto de la administración agrícola basado en la observación, medición y respuesta para identificar la variabilidad en las tierras.
Inteligencia Artificial	Habilidad de una computadora digital o robot controlado que ejecuta tareas se comporta, opera, piensa como humano, además de tener su propia forma racional de procesamiento de la información y comportamiento.
LIDAR	Método que combina diferentes sensores de varias frecuencias y tipos de luces para medir distancias que pueden ser empleadas para crear imágenes en tercera dimensión. Los rayos láser se emplean para crear la luz que es reflejada en la superficie y entonces es capturada por un sensor

3.1. AGRICULTURA DE PRECISIÓN E INTELIGENCIA ARTIFICIAL

La AP es un concepto complejo integrado tanto por elementos de la administración como de la tecnología. En el primer caso, la definición está orientada a la administración de los insumos y productos en términos de cantidad y calidad, lo cual permite gestionar la producción agrícola; además de los riesgos económicos y ambientales, generando un apropiado y enfocado uso de los recursos (Leonard, 2016). Desde la perspectiva tecnológica, la AP es un sistema de administración basado en tecnología como los sensores de control remoto, sistemas de información geográfica, sistemas de posicionamiento global, internet de las cosas y robótica, cada uno empleado para identificar, analizar y administrar el espacio, así como la variabilidad en la temporalidad de los cultivos. De esta forma, es posible proteger al ambiente, reducir costos y obtener mayor rentabilidad y una sustentabilidad óptima (Bongiovanni y Lowenberg-Deboer, 2004; Gebbers y Adamchuk, 2010; Leonard, 2016).

Por su parte, Schrijver (2016) aporta mayor claridad a la definición, al describir que la AP también integra el empleo de técnicas digitales para monitorear y optimizar procesos de producción para la agricultura, en vez de aplicar la misma cantidad de fertilizantes o alimentar a una población de animales con la misma cantidad de comida. Por esta razón, el valor que brinda la AP reside en la medición de distintos escenarios que permiten decidir qué tipo de fertilizantes o cosechas se adaptan mejor a las condiciones del campo.

La literatura en AP desde la perspectiva tecnológica, recientemente se ha enfocado en la IA, la cual es una rama de las ciencias de la computación que busca crear máquinas inteligentes que trabajan y reaccionan como humanos y otros animales. La IA en la agricultura juega un rol irremplazable en la optimización, así como en la agricultura inteligente, robótica y automatizada; además de ser fundamental en los sistemas de soporte de decisiones y sistemas expertos en agricultura (Talaviya et al., 2020 y Zhao, 2019).

Las soluciones que ha brindado la IA en la agricultura han permitido que los agricultores produzcan mayores productos con menos insumos, siendo de mayor calidad

y asegurando una entrada más rápida al mercado. Así, es posible confirmar que el uso de esta tecnología se extiende cada vez más. Cifras que dan cuenta de lo anterior refieren a que en 2020 se utilizaron 75 millones de dispositivos conectados por parte de los agricultores a nivel mundial. De esta forma, para 2050 el promedio de datos que se esperan generar por granja es de 4.1 millones de día (Talaviya et al.).

Sin embargo, aunque la IA ha logrado una contribución bastante grande en el sector agrario por emplear robots y drones (Talaviya et al., 2020), la promesa que brinda todavía no se ha materializado a causa de los obstáculos tecnológicos, sociales y legales (Aijaz et al., 2025).

La investigación AI en la AP se ha enfocado a 21 áreas de estudio que cubren los principales motores de la agricultura. Estas áreas demuestran la transdisciplinariedad de la investigación de la AI en la AP, tal es el caso de las ciencias de la computación, el aprendizaje automático, las ciencias de la información, el mejoramiento de cultivos, la biología, genética, estadística, física, química entre otras disciplinas (Zharo, 2019).

Si bien, existen investigaciones (Daberkow y McBride, 2003; Tobertt et al., 2007; Tey y Brindal, 2012; Walton, 2008) que analizan los factores que impactan en la adopción de la AP, como son la educación, ingreso, ubicación y edad de los agricultores, la rutina que se genera al emplear la AP, instituciones, aspectos legales, el papel de las expectativas económicas en la toma de decisiones para la aceptación de la tecnología; en realidad la adopción de la AI en la AP ha sido escasamente abordada en la literatura del tema. En este punto, surge la necesidad de cubrir esta brecha, por lo que en inicio es necesario establecer la perspectiva teórica y conceptual de la adopción de innovaciones, para lo cual se retoma la Difusión de Innovaciones de Rogers (2003).

3.2. DIFUSIÓN DE INNOVACIONES

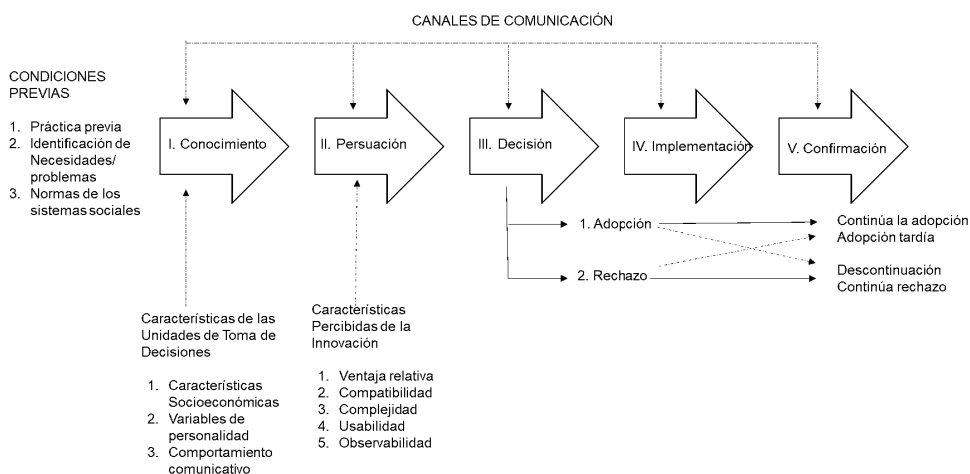
La Teoría de la Difusión de Innovaciones fue propuesta por Rogers (2003), y su constructo teórico define a la innovación como “una idea, práctica u objeto que un individuo u otra unidad de adopción percibe como nuevo” (p.7540), aunque, si los individuos la perciben como nueva, entonces la seguirán considerando como innovación (Sahin, 2006). En el caso de la difusión, Pérez y Terrón (2004) la describen como “el proceso por el cual una innovación se comunica por cientos de canales a través del tiempo entre individuos de un sistema social” (p. 309).

De esta forma, se establecen las pautas para que una innovación sea comunicada a través de distintos canales y en un tiempo definido entre los miembros de un sistema social (Lai, 2017). Además, como se observa en la Figura 1, integra un modelo teórico

que reúne cinco elementos constantes en cualquier estudio sobre la difusión: (I) conocimiento, (II) persuasión, (III) decisión, (IV) implementación y (V) confirmación. Cada uno caracterizado por elementos que los define, tales como los canales de comunicación, el tiempo y el sistema social.

Rogers (2003) refiere que la adopción inicia al compartir información a los usuarios potenciales a través de dos canales: el impersonal que excluye el contacto cara a cara, como son los medios de comunicación, la publicidad, folletos, guías de uso; y el personal, que involucra un contacto cara a cara a través de contactos informales (familiares y amigos), así como contactos formales (instituciones, organizaciones, consultores).

Figura 1. Describe el modelo de las cinco etapas del Proceso de Decisión de Adopción de la Innovación (Rogers, 2003).



El proceso de decisión de adopción de innovaciones como una actividad de búsqueda y procesamiento de información, donde se motiva a reducir la incertidumbre que posee un individuo acerca de las ventajas y desventajas de una innovación. Usualmente, una etapa sigue a otra de manera consecutiva en tiempo y orden. Por tanto, todas deben cumplirse con el objetivo de alcanzar un grado de adopción definitivo (Pérez y Terrón, 2004). No obstante, Lyytinen y Damsgaard, (2017) establecen que las etapas del proceso de adopción no siempre ocurren de manera secuencial, sobre todo en el caso de tecnologías como la AI y la AP.

Otros factores que influyen en el proceso de difusión son el sistema social al que pertenecen, el proceso de comunicación, las características de los promotores, así como los atributos de la innovación, tales como usabilidad, ventaja relativa, compatibilidad, observación y complejidad (Lyytinen y Damsgaard, 2017, p. 177). Al hablar de adopción de

la innovación es preciso indicar que puede aplicarse tanto a fenómenos materiales como abstractos, ya que, a través del tiempo, la definición ha variado de manera significativa. En principio se asoció a la ciencia, tecnología; posteriormente al desarrollo de productos y finalmente a la comercialización de ideas e invenciones (Green, Argawal y Logue, 2015).

4. REVISIÓN CRÍTICA

Una vez abordados los conceptos base, la segunda etapa de la revisión de la literatura integradora consiste en realizar una revisión crítica de los conceptos. De esta forma, se inicia estableciendo que las tecnologías digitales conforman nuevas oportunidades para integrar a los pequeños productores en un sistema alimenticio digitalizado. El Banco Mundial (2016) ha indicado que el 70 por ciento de las poblaciones más pobres de los países en desarrollo tiene acceso a los teléfonos móviles, y más del 40 por ciento de la población mundial tiene acceso a internet, además de existir iniciativas para conectar a más áreas rurales.

Sin embargo, la adopción de tecnologías como la IA y la AP de los países en desarrollo y en específico los pertenecientes a Latinoamérica

enfrentan obstáculos a la adopción como la falta de habilidades digitales y una cultura que fortalezca la innovación y el emprendimiento entre la población rural (Trendov et al., 2019). Como se abordó anteriormente, el estudio de la adopción de la AP ha estado enfocado a identificar factores relacionados con la educación, ingreso, expectativas económicas, edad, rutina, entre otros.

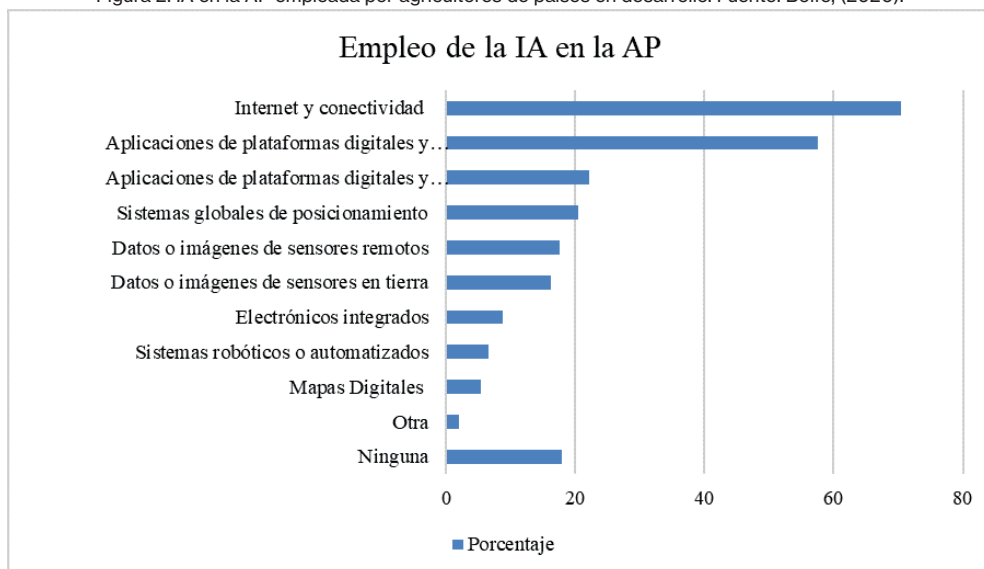
De hecho, la única investigación que refiere a la adopción de la IA en la AP en Latinoamérica es la realizada por Bolfe et al. (2020) respecto al uso de tecnologías digitales por parte de 504 agricultores de Brasil, además de su percepción sobre los beneficios y retos. Los resultados de esta investigación indicaron que los agricultores emplean al menos una tecnología digital en su sistema de producción, como conectividad a internet, aplicaciones móviles, plataformas digitales, software, sistemas satelitales de posicionamiento global, sensores remotos y en tierra. También poseen una percepción positiva respecto al impacto del uso de la tecnología digital.

No obstante, uno de los principales hallazgos indicó que, aunque los agricultores usaban al menos una tecnología de las mencionadas anteriormente, las más empleadas correspondían a bajos niveles de complejidad, como se puede apreciar en la Figura 2. En la gráfica se muestra que tecnologías complejas como los sistemas robóticos o automatizados, sólo fueron empleados por un 6.5 por ciento; en tanto los mapas digitales sólo alcanzaron el 5.4 por ciento de uso. Estas cifras son contrastantes, si se considera que más del 70 por ciento empleaba el internet y la conectividad.

La investigación de Bolfe et al. (2020) se relaciona con la realizada por Trendov et al. (2019) respecto a que las tecnologías digitales tales como la IA en la AP implican una complejidad en su uso, debido a los conocimientos previos que deben existir para comprender su funcionamiento y beneficios, lo que conduce a la necesidad de desarrollar habilidades digitales por parte de los agricultores.

En este sentido la hipótesis generada al inicio de este documento se comprueba, al establecerse la necesidad de gestionar el proceso de adopción de la IA en la AP a partir del desarrollo de las habilidades digitales de los agricultores, en específico porque la investigación demuestra que, aunque emplean tecnologías digitales, éstas son de baja complejidad.

Figura 2. IA en la AP empleada por agricultores de países en desarrollo. Fuente: Bolfe, (2020).

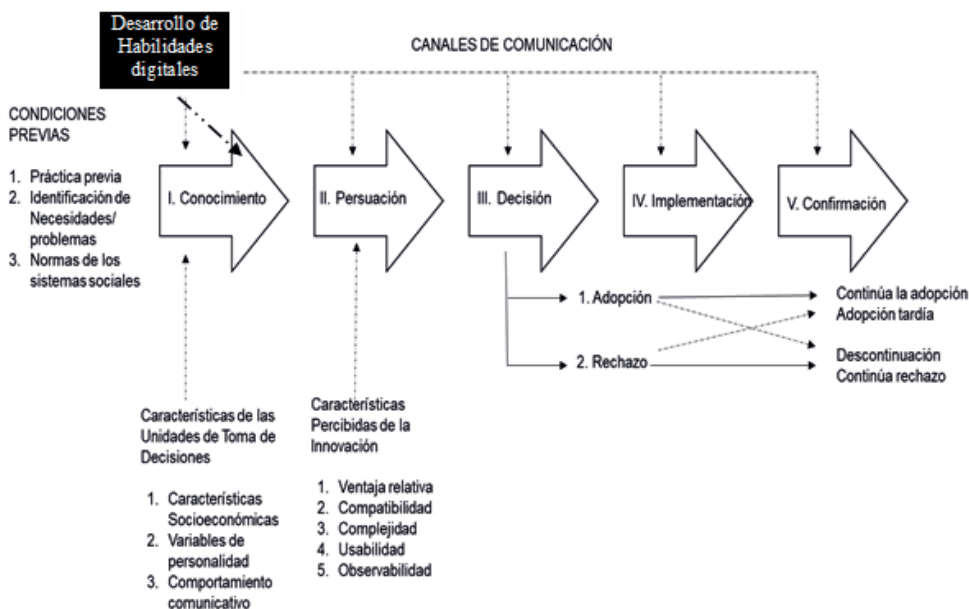


4.1. HABILIDADES DIGITALES EN EL PROCESO DE ADOPCIÓN DE INNOVACIONES DE LA IA Y LA AP

La propuesta del presente trabajo consiste en reconceptualizar el modelo de Difusión de Innovaciones de Rogers (2003) para incorporar en la primera etapa del proceso, relativa al conocimiento de la innovación, el desarrollo de las habilidades digitales (Figura 3), las cuales se definen como un conjunto de habilidades técnicas que permiten el manejo de la información, comunicación, colaboración, creatividad, pensamiento crítico y resolución de problemas dentro de todo el contexto de las tecnologías digitales” (Van Laar et al., 2017).

Se propone que las habilidades digitales se incorporen en la etapa de conocimiento, porque es el momento cuando una persona aprende acerca de la innovación y busca información sobre ella. Además, se generan tres tipos de conocimiento: conciencia, proceso y principios de funcionamiento. Por tanto, “los individuos definen qué es la innovación, cómo y por qué funciona” (Rogers, 2003, p. 21).

Figura 3. Indica la incorporación de las habilidades digitales como parte de la etapa de conocimiento del proceso de Adopción de la IA en la AP. Fuente: con información de Rogers (2003).



De esta forma, el desarrollo de habilidades digitales en la etapa de conocimiento tendrá una influencia en la percepción en las características de la innovación. La experiencia y conocimiento respecto al manejo de las tecnologías de información inciden en percepciones que permiten que la tecnología sea considerada como mejor que otra existente (Ventaja relativa), congruente con los valores del adoptante (Compatibilidad), con un bajo o medio nivel de dificultad (Complejidad), con mayor oportunidad para su uso constante (Usabilidad) y con la aprobación del sistema social (Observabilidad).

5. CONCLUSIONES

La principal aportación del presente trabajo reside en considerar al desarrollo de habilidades dentro del proceso de adopción, sobre todo porque la investigación sobre adopción de la AP está enfocada en identificar y analizar factores como, ingreso, ubicación y edad de los agricultores; así como la rutina que se genera al emplear la AP, las

instituciones que apoyan en la adopción, aspectos legales y el papel de las expectativas económicas en la toma de decisiones para la aceptación de la tecnología.

De esta forma, la gestión de la adopción de la IA en la AP debe considerar a las habilidades digitales, sobre todo en los países en desarrollo. Esta gestión brinda al campo la oportunidad de ser competitivo al producir productos de calidad, con menos costo y más eficiencia en el personal. No obstante, la propuesta de este trabajo es limitada en cuestión de la falta de infraestructura de Tecnología de Información, particularmente las comunidades alejadas o en Pueblos Originarios.

De ahí que la comunicación de la ciencia se considere, para futuras investigaciones, como un elemento esencial en una primera etapa del desarrollo de habilidades digitales, la cual corresponde a las habilidades operacionales. Por esta razón, en este trabajo se establece que, para alcanzar esta primera etapa, la comunicación de la ciencia puede constituirse como un puente que fomenta la interacción entre la comunidad científica y los públicos (Office of Science and Technology and Wellcome Trust, 2000), a la vez de ser una variable que impacta en las percepciones individuales sobre la tecnología. Sobre todo, porque se ajusta a las costumbres, prácticas culturales y lenguaje de los agricultores.

En este sentido, se desarrollan una serie de recomendaciones para la aplicación de esta propuesta:

- a) Aplicación de la comunicación científica informal o educación de la ciencia en ambientes informales (Bell et al., 2009; Lacy y Busch, 1983; Ward et al., 2013), ya que permite conformar un espacio para aprovechar el conocimiento previo y la experiencia de los participantes, aspecto que permite adaptarse a los contextos histórico y sociales al integrar interacciones que abarcan desde la generación de preguntas, analogías y actividades lúdicas.
- b) Esta comunicación científica informal debe transmitirse a través de los canales informales (comunicación cara a cara) que plantea el proceso de difusión, ya que son esenciales para incidir en las etapas de conocimiento y persuasión. Es en estas dos etapas la comunicación de la ciencia donde debe aplicarse con mayor consistencia para que los agricultores que poseen bajos niveles educativos puedan conocer y probar la tecnología, así como percibir sus beneficios.
- c) Emplear a líderes de opinión dentro de las comunidades de agricultores, para iniciar con ellos el proceso de difusión y aplicación de la comunicación científica informal, ya que su influencia en el sistema social es determinante

para atraer voluntariamente a los agricultores y contribuir a la generación de percepciones positivas de la tecnología.

- d) Diseñar instrumentos de medición para el diagnóstico de habilidades operacionales. La experiencia en el uso del internet en el área rural es muy reciente. Por tanto, es necesario identificar niveles de conocimiento que permitan estructurar mensajes y productos comunicativos que integren los valores y lenguaje de los agricultores, a la vez de información relacionada con su nivel de experiencia.
- e) Generar productos comunicativos visuales y en formato físico. Si bien, el desarrollo de habilidades digitales conlleva operar la tecnología, los bajos niveles educativos que existen en la ruralidad de México y América Latina, exige la elaboración de productos tangibles donde destaque imagen visual.
- f) Potenciar alianzas entre universidades, organismos de la sociedad civil y entidades gubernamentales o gobiernos municipales con compañías productoras de dispositivos móviles, para generar programas de donación o comodato. Para las compañías estas alianzas también pueden ser parte de sus programas de Responsabilidad Social Corporativa² y para los gobiernos ser un activo que promueva el Valor Público³.

Las recomendaciones antes descritas van hacia cualquier universidad, institución de educación superior u organismos del sector privado o sociedad civil que integren dentro de sus planes de estudio, líneas de investigación u objeto social actividades relacionadas con las Tecnologías de Información y Comunicaciones, o estudios sobre la Ciencia, Tecnología y Sociedad (STS en inglés). Esta especificación se genera, porque se busca que este tipo de organizaciones comparta el conocimiento y recursos que han adquirido como parte de su propia actividad, ya sea porque su propósito es generar reputación y posicionamiento ante sus públicos para diferenciarse de la competencia, o por el cumplimiento de requisitos que exigen instancias gubernamentales.

Finalmente, es importante considerar que el desarrollo de habilidades digitales en la ruralidad de México y América Latina no es uniforme, por lo que el diagnóstico se convierte en una herramienta esencial para la personalización de iniciativas. Por ello, poner en la mira que el desarrollo de habilidades operacionales es el primer paso a considerar para la inclusión de los agricultores en la Agricultura 4.0, resulta de profundo interés para el análisis prospectivo y para el proceso de anticipación de la dinámica tecnológica

² Modelo de negocios autoregulado que apoya a una empresa a ser socialmente responsable respecto a sí misma, sus stakeholders o grupos de interés y los públicos a los que atiende (Strategic Direction, 2018, p.2).

³ Concepto que propone que los recursos públicos deben ser utilizados para incrementar el valor, de la misma forma que se crea valor en el sector privado (Moore, 1998).

en la que México y América Latina requieren participar, con el objetivo de alcanzar, en primer lugar, su propia seguridad alimentaria, y en segundo lugar ser competitivos a nivel internacional dentro del sector agrícola. En caso contrario, existe el riesgo de afrontar la escasez de alimentos y agudizar el rezago económico originado por la falta de eficiencia e innovación en el campo.

AGRADECIMIENTOS

La autora agradece a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) en México para el desarrollo de este trabajo, que forma parte del proyecto “Ciencia Ciudadana con perspectiva de género”.

REFERENCIAS

Aijaz, N., Lan, H., Raza, T., Yqub, M., Iqbal, R. y Pathan, M. (2025) . Artificial intelligence in agricultura: Advancing crop productivity and sustainability. *Journal of Agriculture and Food Research*, 20 (1). <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2025.101762>

Banco Mundial. (2016). *World Development Report 2016: Digital Dividends*.

Bell, P., Lewenstein, B. V., Shouse, A., y Feder, M. (Eds.). (2009). *Learning Science in Informal Environments: People, Places, and Pursuits*. National Academies Press.

Bolfe, E., de Castro, L., Del'Arco, I., Luchiari, A., Cabral, C., de Castro, D. y Yassushi, R. (2020). Precision and Digital Agriculture: Adoption of Technologies and Perception of Brazilian Farmers. *Agriculture*. 10 (1), 1-16.

Bongiovanni, R. y Lowenberg-Deboer, J. (2004). Precision Agriculture and Sustainability. *Precision Agriculture* 5 (1), 359_387.

Daberkow S. y McBride, D. (2003). Farm and Operator Characteristics Affecting the Awareness and Adoption of Precision Agriculture Technologies in the US. *Precision Agriculture*. 4 (1), 163- 1777

FAO (2018). *The State of Food Security and Nutrition in the World: Building Resilience for Peace and Food Security*. <http://www.fao.org/news/story/en/item/1152031/icode/>

Green, R., Argawl, R. y Logue, D (2015) Innovation. en: Wright, J. D. *International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences* (2.ed.). <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978008097086873087X?via%3Dihub>

Grupo ETC (2019). *La insostenible agricultura 4.0*. https://www.etcgroup.org/sites/www.etcgroup.org/files/files/la_insostenible_agricultura_4.0_web26oct.pdf

Gebbers, R. y Adamchuk, V. (2010). Precision agriculture and food security. *Science* 327, 828-831.

Guirao, S. (2015). Utilidad y tipos de revisión de literatura. *ENE, Revista de Enfermería*, 9 (2). http://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1988-348X2015000200002

Innovación Educativa (2020). Editorial. *Innovación Educativa*, 80 (20), 5-6.

Klerkx, L. y Rose, D. (2020). Dealing with the game-changing technologies of Agriculture 4.0: How do we manage diversity and responsibility in food system transition pathways?. *Global Food Security*, 24 (1). <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2019.100347>

Lacy, W. y Busch, L. (1983). Informal scientific communication in the agricultural sciences. *Information Processing & Management*, 19 (4), p. 193-202.

Lai, P. (2017). The Literature Review of Technology Adoption Models and Theories for the Novelty Technology. *Journal of Information Systems and Technology Management*. 14 (1), 21-38.

Leonard, E. (2016). *Precision Agriculture*. AgriknowHow. Australia: Elsevier.

Lyytinen, K. y Damsgaard, J. (2017). What's wrong with the Diffusion Innovation Theory? en *Diffusing Software Product and Process Innovations*. TDIT 2001. IFIP – The International Federation for Information Processing. Springer.

Moore, M. (1998), *Gestión estratégica y creación de valor en el sector público*. Paidós.

Office of Science and Technology and Wellcome Trust (2000). *Science and the public: A review of science communication and public attitudes to science in Britain*. http://www.wellcome.ac.uk/stellent/groups/corporatesite/@msh_peda/documents/web_document/wtd003419.pdf

Pérez, M. y Terrón, M. (2004). La Teoría de la Difusión de la Innovación y su Aplicación al estudio de la Adopción de Recursos Electrónicos por los Investigadores en la Universidad de Extremadura. *Revista Española de Docencia Científica*, 27 (3), 308-329.

Rogers, E. (2003). *Diffusion of innovations* (5a Ed.). Free Press.

Sahin, I. (2006). Detailed review of Roger's diffusion of innovations theory and educational technology-related studies based on Roger's theory. *Turkish Online Journal of Educational Technology*. 5 (2), 14-18.

Schrijver, R., 2016. *Precision agriculture and the future of farming in Europe*. Scientific Foresight Study. European Union, Brussels. [http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2016/581892/EPRS_STU\(2016\)581892_EN.pdf](http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2016/581892/EPRS_STU(2016)581892_EN.pdf)

Snyder, Hannah (2019), *Literature review as a research methodology: An overview and guidelines*. *Journal of O Research*, 104 (1), 333-339.

Strategic Direction (2018). *The role of CSR in business strategy: Maintaining competitive advantage with a clearly-defined CSR programme*. *Strategic Direction*, 34(10). 13-15.

Talaviya, T., Shah, D., Patel, N., Yagnik, H. y Shah, M. (2020). Implementation of artificial intelligence in agriculture for optimisation of irrigation and application of pesticides and herbicides. *Artificial Intelligence in Agriculture*.

Tey Y. y Brindal M. (2020) Factors influencing the adoption of precision agricultural technologies: a review for policy implications. *Precision Agriculture*. 13 (1), 713-730.

Torbett J., Roberts, K., Larson, J., English, B. (2007). Perceived importance of precision farming technologies in improving phosphorus and potassium efficiency in cotton production. *Precision Agriculture*, 8 (1), 127-137.

- Torrance, R. (2015). Writing Integrative Reviews of the Literature: Methods and Purposes. *International Journal of Adult Vocational Education and Technology*, 7 (3), 62-70.
- Trendodov, N., Varas, S. y Zeng, M. (2019). Digital Technologies in Agriculture an Rural Areas. <http://www.fao.org/3/ca4887en/ca4887en.pdf>
- Ward, W., Millar, J. y Southwell, A. (2013). The role of communication between scientists involved in agricultural development in South East Asia. Report No.69. https://cdn.csu.edu.au/_data/assets/pdf_file/0003/884280/69-Communiation-SEAsia_Agric.pdf
- Wittermore, R. y Knafelz, K. (2005). The integrative review: updated methodology. *Journal of Advanced Nursing*, 52(1). 546-553. DOI: 10.1111/j.1365-2648.2005.03621.x
- United Nations Department of Economics and Social Affairs (2019). World Population Prospects 2019. https://population.un.org/wpp/Publications/Files/WPP2019_10KeyFindings.pdf
- Van-Laar, E., Van-Deursen, A., Van-Dijk, J., 6 De-Haan, J. (2017). The relation between 21st-century skills and digital skills: A systematic literature review. *Computers in Human Behavior*, 72 (1), 577-588.
- Ynzunza, C., Landeta, I., Bocarando, J., Aguilar, F. y Larios, M. (2017). El entorno de la Industria 4.0: Implicaciones y Perspectivas futuras. *Conciencia Tecnológica*, 54 (1). <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=94454631006>
- Zambon, I., Cecchini, M., Egidi, G., Saporito, M. G., Y Colantoni, A. (2019). Revolution 4.0: Industry vs. Agriculture in a Future Development for SMEs. *Processes*, 7(1). <http://dx.doi.org/10.3390/pr7010036>
- Zhao, C. (2019). Inaugural Editorial. Artificial Intelligence in Precision Agriculture. 1 (1), A1-A2.

CAPÍTULO 8

CARACTERES FISICOQUÍMICOS Y ANTOCIANINAS EN SEMILLAS DE LOS GENOTIPOS PARENTALES DEL HÍBRIDO DE MAÍZ AZUL DRÁCULA H 13

Data de submissão: 28/05/2026

Data de aceite: 12/06/2026

José Luis Arellano-Vázquez

Instituto Nacional de Investigaciones
Forestales, Agrícolas y Pecuarias
Campo Experimental Valle de México
Coatlinchán, México
<https://orcid.org/0000-0002-2231-2940>

Germán Fernando Gutiérrez-Hernández

Instituto Politécnico Nacional
Unidad Profesional Interdisciplinaria de
Biotecnología
Ciudad de México, México
<https://orcid.org/0000-0003-3312-3747>

Martín Filiberto García-Mendoza

Instituto Politécnico Nacional
Unidad Profesional Interdisciplinaria de
Biotecnología
Ciudad de México, México

Estela Flores-Gómez

Instituto Politécnico Nacional
Unidad Profesional Interdisciplinaria de
Biotecnología
Ciudad de México, México
<https://orcid.org/0000-0002-4634-455X>

RESUMEN: En México, los maíces pigmentados muestran la tendencia a incrementar su consumo en la dieta de la población y a requerir de mayor producción de grano para abastecer esa demanda creciente. Una de las estrategias para elevar la producción de maíz azul consiste en formar híbridos con rendimientos altos de grano, en los cuales es conveniente conocer cómo se determinan sus características fisicoquímicas y contenido de antocianinas a través de sus genotipos parentales. El objetivo del presente estudio fue analizar las relaciones entre los componentes fisicoquímicos (proteína, almidón e índice de flotación) y el contenido de antocianinas en semillas del híbrido trilineal de maíz azul Drácula H-13, abarcando su secuencia de genotipos parentales (líneas progenitoras y cruza simple y trilineal). Se evaluaron los contenidos de proteína, almidón y antocianinas y se estimó el índice de flotación. Los resultados se sometieron a análisis de varianza, comparación de medias (Tukey $p \leq 0.05$) y correlación lineal. Se concluyó que la craza trilineal, que corresponde al híbrido Drácula H-13, expresó semillas más duras, característica favorable para el manejo y aprovechamiento del grano, además de mayor contenido de antocianinas y almidón.

PALABRAS CLAVE: *Zea mays* L.; almidón; antocianinas; dureza de grano; proteína.

PHYSICOCHEMICAL CHARACTERISTICS AND ANTHOCYANINS IN SEEDS OF THE PARENTAL GENOTYPES OF THE DRACULA H 13 BLUE MAIZE HYBRID

ABSTRACT: In Mexico, pigmented corns show a tendency to increase consumption in the population's diet and to require greater grain production to meet that growing demand. One of the strategies to increase blue corn production is to develop hybrids with high grain yields, in which it is useful to understand how their physicochemical characteristics and anthocyanin content are determined through their parental genotypes. The objective of the present study was to analyze the relationships between the physicochemical components (protein, starch, and flotation index) and anthocyanin content in seeds of the Drácula H 13 **three-way crosses blue corn hybrid**, covering its sequence of parental genotypes (parental lines and simple and **three-way crosses**). Protein, starch, and anthocyanin contents were evaluated, and the flotation index was estimated. The results were subjected to analysis of variance, mean comparison (Tukey, $p \leq 0.05$), and lineal correlation. It was concluded that the **three-way crosses**, corresponding to the Dracula H-13 hybrid, produced harder seeds, a favorable characteristic for the handling and use of the grain, in addition to higher content of anthocyanins and starch.

KEYWORDS: *Zea mays* L.; starch; anthocyanins; grain hardness; protein.

1. INTRODUCCIÓN

El maíz (*Zea mays* L.) es el cultivo principal en México y en el mundo, su volumen de producción supera el de arroz y trigo (FAOSTAT, 2026). Su siembra sigue incrementándose en Europa y África con fines diversos, que van desde grano para alimento humano o animal, forraje verde o seco, biocombustible o extracción de alta fructosa o colorantes naturales (antocianinas). Esta gama de beneficios es factible por la plasticidad y la variabilidad genética de esta gramínea; en consecuencia, su siembra sigue expandiéndose y aún es insuficiente su producción.

En particular para México, los maíces pigmentados (azul, rojo, amarillo) muestran la tendencia a incrementar su consumo en la dieta de la población y a requerir de mayor producción de grano para abastecer esa demanda creciente, sobre todo de grano de color azul, el cual es ingrediente esencial para un sinnúmero de platillos tradicionales (Arellano *et al.*, 2023a) y que también tiene auge en la industria alimenticia, vitivinícola, farmacéutica y dermatológica, dado su contenido de antocianinas. Con el término maíz azul se hace referencia a los que presentan semillas de color morado, azul o negro (Salinas *et al.*, 2013), cada uno de estos colores con distintas coordenadas (Arellano *et al.*, 2021).

Las antocianinas son los pigmentos naturales que le confieren ese color azul y se ha documentado su relación con prevención de enfermedades cardíacas y reducción del colesterol, entre otras propiedades (Shah *et al.*, 2016; Damián-Medina *et al.*, 2020).

Para contribuir a elevar la productividad de este grano, en el Programa de Mejoramiento de Maíz Azul del Campo Experimental Valle de México, dependiente

del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, se han conformado híbridos a partir del germoplasma criollo (nativo), los cuales poseen características sobresalientes de rendimiento de grano, con color azul uniforme e intenso y con adaptación a las condiciones agroecológicas de la región central de México, que abarca los estados de México, Tlaxcala, Puebla y Ciudad de México, cuyas altitudes van de 2600 a 2800 msnm (Arellano *et al.*, 2023b; Arellano *et al.*, 2023c).

Existen aún muchos aspectos por conocer del maíz azul; entre ellos, cómo interaccionan entre sí los contenidos de proteína, almidón, antocianinas y la dureza del grano; esto es, cómo están en cada progenitor del híbrido, luego como se determinan en cada una de las cruzas involucradas y, finalmente, cómo se expresan en el híbrido resultante, esto porque el desarrollo de los híbridos involucra el fenómeno de la heterosis en cada craza y en cada característica estimada (Singh, 1987).

La dureza del grano de maíz se refiere a la resistencia que éste opone a modificar su forma o su integridad física cuando se somete a fuerzas mecánicas durante la cosecha o su manejo posterior a ella. Se ha establecido que la dureza del grano está bajo control genético y ambiental (Aragón-Cuevas *et al.*, 2012), según la proporción que tenga el grano del endospermo vítreo sobre el harinoso (Arriaga-Pérez *et al.*, 2019); si predomina el endospermo vítreo, el grano tendrá mayor dureza (Kucheryavskiy y Williams, 2016).

Para maíces con endospermo de color blanco, se ha reportado que la dureza del grano se relaciona de manera directa con el contenido proteico (Salinas *et al.*, 1992) e inversa con el contenido de almidón (Salinas y Pérez, 1997).

Entre los métodos para medir la dureza del grano está el índice de flotación y es de los más empleados en maíz. Se fundamenta en que los granos duros son más densos porque sus gránulos de almidón son compactos y tienen mayor proporción de endospermo vítreo que del harinoso; por tanto, flotan menos que los suaves (Gaytán-Martínez *et al.*, 2013).

El objetivo del presente estudio fue analizar las relaciones entre los componentes fisicoquímicos (proteína, almidón e índice de flotación) y el contenido de antocianinas en semillas del híbrido trilineal de maíz azul Drácula H-13, abarcando su secuencia de genotipos parentales (líneas progenitoras y cruzas simple y trilineal).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. GENOTIPOS

Se utilizaron semillas de tres líneas endogámicas (A, B y C), de la craza simple (B x C) y de la craza trilineal [(B x C) x A], genotipos que conforman la secuencia de parentales

del híbrido trilineal de maíz azul Drácula H13 (Cuadro 1). Este híbrido se desarrolló en el Programa de Mejoramiento Genético de Maíz Azul del Campo Experimental Valle de México (CEVAMEX) del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP).

Cuadro 1. Descripción de los tratamientos (genotipos) utilizados en el estudio.

Tratamientos	Genotipo
Líneas	
A	L3
B	L11
C	L12
Cruzas	
D	(L11 x L12)
E	[(L11 x L12) x L3]

2.2. VARIABLES EVALUADAS

2.2.1. Proteína (PRO, %)

Se estimó el contenido de nitrógeno total con el espectrofotómetro de reflectancia en el infrarrojo cercano (NIRS); en este procedimiento se evaluó el color verde esmeralda producido por la reacción entre el salicilato de sodio, el hipoclorito de sodio y el amoníaco, dicho valor se cotejó con una curva de calibración realizada para el contenido total de nitrógeno en harina de maíz; por último, para calcular la proteína total se multiplicó el nitrógeno total por 6.25, que es el factor de conversión para maíz (Galicia *et al.*, 2012).

2.2.2. Almidón (ALM, %)

Se cuantificó hidrolizándolo parcialmente primero para formar dextrinas y, en una segunda hidrólisis, esas dextrinas se redujeron a glucosa mediante la amiloglucosidasa; la glucosa se cuantificó colorimétricamente a 630 nm en un espectrofotómetro, utilizando el reactivo antrona (Galicia *et al.*, 2012), con este valor se estimó el almidón total como se indica a continuación.

$$\text{Almidón total (mg/100 mg de harina)} = [\text{GLU}] (\text{FD}) (\text{V}) (\text{FHAML}) (100) / \text{PS}$$

Donde:

[GLU] = concentración de glucosa (mg/mL), FD = factor de dilución, V = volumen original del extracto de almidón (20 mL), PS = peso seco de la harina (20 mg) y FHAML = Factor de hidrólisis del almidón (0.9).

2.2.3. Índice de flotación (IF, %)

Se tomaron al azar 100 semillas de cada uno de los genotipos de maíz bajo estudio y se vertieron en 500 mL de solución de nitrato de sodio (41 %, p/v, a una densidad de 1.25 g/mL) contenida en un vaso de precipitado de 1 L. Con un agitador de vidrio se revolviaron las semillas (de derecha a izquierda y viceversa) durante 10 s y, después de 30 s de reposo, se contaron las semillas que flotaron (Arriaga-Pérez *et al.*, 2019; CIMMYT SADER ASERCA, 2019).

2.2.4. Antocianinas (ANT, µg Pel/g)

Este pigmento se cuantificó según lo reportado por Galicia *et al.* (2012). Se utilizaron 30 semillas molidas finamente, la harina se secó a 65 °C durante 16 h. Se leyeron las muestras a 520 nm en el espectrofotómetro y se preparó la solución patrón de cloruro de pelargonidina (100 mg/mL) en ácido trifluoroacético (1 %, v/v).

2.3. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Se utilizó un diseño experimental de bloques completamente al azar con tres repeticiones de 100 semillas.

Los resultados obtenidos se sometieron a análisis de varianza, se hizo la prueba de comparación de medias de tratamientos por el método de Tukey ($p \leq 0.05$) y se aplicó la prueba de correlación lineal de Pearson ($p \leq 0.05$ y $p \leq 0.01$).

El procesamiento estadístico de los datos se hizo con el programa SAS (SAS, Inst. ver. 9).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis de varianza de los resultados obtenidos detectó significancia estadística alta ($p \leq 0.01$) en todas las variables (Cuadro 2), los coeficientes de determinación fueron cercanos al 100 % y los de variación muy reducidos, lo cual indicó que los experimentos realizados fueron confiables.

Cuadro 2. Análisis de varianza para las variables evaluadas en el presente estudio.

Variable	Coefficiente de determinación (%)	Coefficiente de variación (%)	Cuadrado medio de tratamientos	Cuadrado medio del error	Significancia
PRO	97	1.8	3.59	0.03	**
ALM	90	0.88	8.46	0.38	**
IF	99	3.52	2588.93	5.8	**
ANT	99	0.99	37794.28	11.85	**

** = Altamente significativo ($p \leq 0.01$).

Con base en lo antes expuesto, se procedió a efectuar la comparación estadística de las medias de tratamientos (Cuadro 3).

Cuadro 3. Comparación de medias de tratamientos (Tukey, $p \leq 0.05$), para las variables evaluadas en el estudio.

Genotipo	PRO (%)	ALM (%)	IF (%)	ANT ($\mu\text{g Pel/g}$)
A	11.41 a	67.46 b	86.00 b	178.63 e
B	8.36 c	67.69 b	84.33 b	366.46 c
C	9.51 b	70.34 a	94.67 a	431.09 b
D	9.65 b	71.27 a	53.33 c	299.65 d
E	9.55 b	69.87 a	24.00 d	458.14 a
CME	0.03	0.38	5.8	11.85
DMSH	0.47	1.65	6.47	9.25

En columnas, letras distintas indicaron diferencias significativas ($p \leq 0.05$). CME = Cuadrado medio del error. DMSH = Diferencia mínima significativa honesta.

Se apreció que los genotipos se comportaron muy disímolos entre sí desde las mismas líneas endogámicas (A, B y C). En PRO, la línea A ocupó el primer nivel de significancia, seguida por C y B; en las variables ALM, IF y ANT, los valores mayores fueron para la C y después para B y A.

En la cruce simple del híbrido (Genotipo D), los contenidos de PRO y de ALM permanecieron estadísticamente iguales a los del progenitor masculino de esta cruce, que es la línea C (L12); en tanto que el IF se redujo significativamente en comparación con las líneas involucradas en dicha cruce (B y C). El contenido de ANT de esta cruce simple resultó estadísticamente menor al de las líneas participantes en ella; sin embargo, esta variable se elevó sustancialmente en la cruce trilineal, es decir, la incorporación de L3, como progenitor masculino, a la cruce simple (D) (Cuadro 1), confirió significativamente mayor cuantía del pigmento en la cruce trilineal (E).

El contenido de PRO en las cruces D y E fue menor que el promedio de las tres líneas, mientras que el IF disminuyó drásticamente ($p \leq 0.05$) de las líneas a las referidas cruces; esto es, con los cruzamientos aumentó la dureza del grano y se redujo el contenido proteico. Está demostrado que los maíces con endospermo suave o harinoso presentan menor contenido de proteína (Salinas *et al.*, 1992); sin embargo, este hecho no se detectó en el análisis de correlación efectuado, lo cual se discute en líneas posteriores.

Los valores de PRO e IF se redujeron significativamente en las cruces (D y E) con respecto a las líneas y, de manera opuesta, los valores de ALM y ANT se elevaron. Este comportamiento denotó que las semillas de las cruces alcanzaron menos proteína que sus respectivas líneas, pero resultaron más duras y con mayor acumulación de ALM y ANT.

En la correlación lineal (Cuadro 4) solo se detectó significancia estadística entre PRO y ANT con un coeficiente negativo (-0.69**), esto indicó la incompatibilidad de tener cantidades elevadas de ambos componentes químicos, al menos en los genotipos que conforman el híbrido de endospermo azul manejado en este estudio (Drácula H 13). Desde el punto de vista del mejoramiento genético es conveniente conocer este comportamiento; sin embargo, su manejo es complicado y los reportes sobre maíces azules son escasos en este sentido.

Cuadro 4. Coeficientes de correlación lineal para las variables evaluadas en el presente estudio.

	PRO	ALM	IF	ANT
PRO	1.0	-0.17 ns	0.09 ns	-0.69 **
ALM		1.0	-0.40 ns	0.42 ns
IF			1.0	-0.35 ns
ANT				1.0

** = Altamente significativo ($p \leq 0.01$).

A excepción de la ya mencionada asociación negativa y significativa que resultó entre PRO y ANT, los resultados de correlación obtenidos (Cuadro 4) denotaron que no existió interdependencia entre los caracteres fisicoquímicos restantes (PRO, ALM e IF), esto se ha establecido también por otros autores (Salinas *et al.*, 1992); aunque para granos de maíz blanco.

4. CONCLUSIONES

Las semillas de las cruza simple y trilineal del Híbrido Drácula H13 presentaron menor contenido proteico que sus respectivas líneas; sin embargo, fueron más duras y tuvieron mayor proporción de almidón y de antocianinas.

De acuerdo con la correlación negativa y significativa (-0.69 **) obtenida entre proteínas y antocianinas, estos componentes variaron de manera inversa en la secuencia de genotipos evaluada; por tanto, en la cruza trilineal se tuvo el nivel menor de proteínas, pero la mayor cantidad de antocianinas, este resultado fue relevante para la meta de desarrollar híbridos azules.

La cruza trilineal, que es propiamente el híbrido Drácula H 13, expresó semillas con mayor dureza, lo que se traduce en mayor rendimiento, y mayor contenido de antocianinas y almidón.

BIBLIOGRAFÍA

Aragón-Cuevas, F.; Cárdenas F., J. de D.; Zárate M., F.; Arellano-Vázquez, J.L.; Gaytán, M. 2012. Calidad Industrial de Maíces Nativos de la Sierra Sur de Oaxaca. Oaxaca, México.

Arellano Vázquez, J.L.; Herrera Zamora, A.; Gutiérrez Hernández, G.F.; Ceja Torres, L.F.; Flores Gómez, E. 2021. Color, contenido de antocianinas y dimensiones de semilla en líneas endogámicas de maíz azul y sus cruces. IDESIA (Chile) 39(3): 75-82.

Arellano-Vázquez, J.L.; Gutiérrez-Hernández, G.F.; Rojas-Martínez, I.; Fernández-Sosa, R. 2023^a. Híbridos de maíz azul para localidades de alto, mediano y bajo potencial productivo del altiplano central de México. XIII Reunión Nacional de Investigación Agrícola. Memoria. Chihuahua, Chih. México. pp. 526-528.

Arellano-Vázquez, J.L.; Gutiérrez-Hernández, G.F.; Rojas-Martínez, I.; Fernández-Sosa, R. 2023^b. Vampiro H 12 híbrido de maíz azul de madurez intermedia y grano semicristalino para áreas de temporal y riego del altiplano central de México. XIII Reunión Nacional de Investigación Agrícola. Memoria. Chihuahua, Chih. México. pp. 529-531.

Arellano-Vázquez, J.L.; Rojas-Martínez, I.; Fernández-Sosa, R. 2023^c. Vampiro H 10 híbrido de maíz azul madurez intermedia grano harinoso para áreas de temporal y riego del altiplano central de México. XIII Reunión Nacional de Investigación Agrícola. Memoria. Chihuahua, Chih. México. pp. 745-748.

Arriaga-Pérez, W; Gaytán-Martínez, M.; Reyes-Vega, M.L. 2019. Métodos para medir la dureza del grano de maíz: Review. DIGIT/\L CIENCI/\@U/\QRO. ISSN: 2395-8847 (12) 2. Julio-diciembre. pp. 67-78.

CIMMYT SADER ASERCA. Determinación de calidad de semilla de maíz. 2019. Claridades agropecuarias 291. 72 pp. ISSN 0188-9974.

Damián-Medina, K.; Salinas-Moreno, Y.; Milenkovic, D.; Figueroa-Yáñez, L.; Marino-Marmolejo, E.; Higuera-Ciapara, I.; Vallejo-Cardona, A.; Lugo-Cervantes, E. 2020. *In silico* analysis of antidiabetic potential of phenolic compounds from blue corn (*Zea mays* L.) and black bean (*Phaseolus vulgaris* L.). Heliyon 6, e03632. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03632>.

FAOSTAT. 2026. <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QV,2026>. Consultado 31 mayo 2026.

Galicia, L.; Miranda, A.; Gutiérrez, M.G.; Custodio, O.; Rosales N., A.; Ruiz R., S.; Palacios R., N. 2012. Laboratorio de Calidad Nutricional de Maíz y Análisis de Tejido Vegetal. Protocolos de Laboratorio. Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo. México, D.F. 50 p.

Gaytán-Martínez, M.; Figueroa-Cárdenas, J.D.; Reyes-Vega, M.L.; Morales-Sánchez, E.; Rincón-Sánchez, F. 2013. Maize landraces selection for industrial end-use based on their added value. Revista Fitotecnia Mexicana, 36[Suppl.3]: 339-346.

Kucheryavskiy, S.V.; Williams, P.J. 2016. Classification of objects on hyperspectral images – further method development. Abstract from International conference in spectral imaging, Chamonix-Mont-Blanc, France.

MacRobert, J.F.; Sentimela, P.S.; Gethi, J.; Worku, M. 2014. Manual de producción de semilla de maíz híbrido. Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo. CIMMYT, México, D.F., 37 p. Available online: <https://repository.cimmyt.org/bitstream/handle/10883/16849/57179.pdf> (consultado 9 diciembre 2023).

Salinas M., Y.; Arellano V., J.L. Martínez B., F. 1992. Propiedades físicas, químicas y correlaciones de maíces híbridos precoces para valles altos. In: Archivos Latinoamericanos de Nutrición. Sociedad Latinoamericana de Nutrición. (42) 2: 161-167. Ven. ISSN: 0004-0622.

Salinas M., Y.; Pérez H., P. 1997. Calidad nixtamalera-tortillera en maíces comerciales de México. Rev Fitotec Mex 20: 121-136.

Salinas Moreno, Y.; Aragón Cuevas, F.; Ybarra Moncada, C.; Aguilar Villarreal, J.; Altunar López, B.; Sosa Montes, E. 2013. Caracterización física y composición química de razas de maíz de grano azul/morado de las regiones tropicales y subtropicales de Oaxaca. Rev Fitotec Mex Vol. 36 (1): 23 – 31.

SAS (Statistical Analysis System). 2002. SAS Institute, Inc. Ver. 9. SAS/STAT Inst. Inc.: Cary, NC, USA.

Shah, T.R.; Prasad, K.; Kumar, P. 2016. Maize a potential source of human nutrition and health: A review. Cogent Food Agric 2, 1166995. <https://doi.org/10.1080/23311932.2016.1166995>.

Singh, J. Field Manual of Maize Breeding Procedures; Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO): Rome, Italy, 1987; 209p.

CAPÍTULO 9

IDENTIFICACIÓN FÍSICA Y MOLECULAR DE LAS LÍNEAS Y CRUZAS QUE CONFORMAN AL HÍBRIDO DE MAÍZ AZUL VAMPIRO H10

Data de submissão: 30/05/2026

Data de aceite: 15/06/2026

Patricia Vázquez-Lozano

Instituto Politécnico Nacional

Unidad Profesional

Interdisciplinaria de Biotecnología

Ciudad de México, México

<https://orcid.org/0000-0002-5945-6307>

Germán Fernando Gutiérrez-Hernández

Instituto Politécnico Nacional

Unidad Profesional

Interdisciplinaria de Biotecnología

Ciudad de México, México

<https://orcid.org/0000-0003-3312-3747>

José Luis Arellano-Vázquez

Instituto Nacional de Investigaciones

Forestales, Agrícolas y Pecuarias

Campo Experimental Valle de México

Coatlinchán, México

<https://orcid.org/0000-0002-2231-2940>

Estela Flores-Gómez

Instituto Politécnico Nacional

Unidad Profesional

Interdisciplinaria de Biotecnología

Ciudad de México, México

<https://orcid.org/0000-0002-4634-455X>

Aída Margarita Zamora-Contreras

Instituto Politécnico Nacional

Unidad Profesional

Interdisciplinaria de Biotecnología

Ciudad de México, México

<https://orcid.org/0000-0003-4467-7817>

RESUMEN: El maíz (*Zea mays* L.) es el cultivo más importante a nivel mundial debido a su valor nutricional, su versatilidad en la industria agroalimentaria y su relevancia en la seguridad alimentaria de muchas naciones. En particular, el maíz azul ha ganado interés por su contenido de antocianinas, pigmentos naturales que originan su color exótico y apetitoso y que poseen también propiedades antioxidantes y beneficios potenciales para la salud humana. Actualmente, la producción de maíz azul en México es insuficiente. Para incrementarla, en el Programa de Maíz Azul del Campo Experimental Valle de México (CEVAMEX, INIFAP) se han desarrollado híbridos de rendimiento alto, este es el caso del Vampiro H10. Entre las características deseables en un híbrido de maíz se tienen las dimensiones físicas y la identidad genética de las semillas, tanto de los progenitores como del híbrido mismo; en el presente estudio se abordaron ambos aspectos, para el primero se midieron peso, anchura, grosor y longitud de las semillas y, para el segundo, se aplicó la amplificación aleatoria del ADN polimórfico anclado por microsatélites (RAMPD, por sus siglas en inglés). El objetivo del trabajo fue

generar la huella genómica de los parentales del híbrido de maíz azul Vampiro H10 y relacionarla con los descriptores físicos de las semillas. En los atributos físicos evaluados, el dendrograma distinguió dos grupos en las líneas parentales, uno formado por C y otro por A y B; el primero de ellos al 43 % y el segundo al 73 % de similaridad, este hecho se relacionó estrechamente con la genealogía de las referidas líneas; mientras que, las cruzas se diferenciaron (bifurcaron) al 70 % de similaridad. En el dendrograma molecular se definió específicamente cada línea al 74 % de similaridad, esto coincidió también con su genealogía; sin embargo, las cruzas simple y trilineal permanecieron unidas.

PALABRAS CLAVE: *Zea mays*; antocianinas; características físicas; maíz azul.

PHYSICAL AND MOLECULAR IDENTIFICATION OF THE LINES AND CROSSES COMPRISING THE VAMPIRO H10 BLUE MAIZE HYBRID

ABSTRACT: Corn (*Zea mays* L.) is the most important crop worldwide due to its nutritional value, its versatility in the agri-food industry, and its relevance to the food security of many nations. Blue corn has gained interest because of its anthocyanin content, natural pigments that give it its exotic and appetizing color and also have antioxidant properties and potential benefits for human health. Currently, the production of blue corn in Mexico is insufficient. To increase it, in the Blue Corn Program at the Valle de México Experimental Field (CEVAMEX, INIFAP), high-yield hybrids have been developed, such is the case of Vampiro H10. Among the desirable characteristics in a maize hybrid are the physical dimensions and the genetic identity of the seeds, both parents and of the hybrid itself; in the present study, both aspects were addressed. For the first, the weight, width, thickness, and length of the seeds were measured, and for the second, random amplification of polymorphic DNA anchored by microsatellites (RAMPD) was applied. The aim of the work was to generate the genomic fingerprint of the parents of the blue maize hybrid Vampiro H10 and relate it to the physical descriptors of the seeds. In the evaluated physical attributes, the dendrogram distinguished two groups in the parental lines, one formed by C and the other by A and B; the first of them at 43% and the second at 73% similarity. This fact was closely related to the genealogy of the mentioned lines; meanwhile, the crosses were differentiated (branched) at 70% similarity. In the molecular dendrogram, each line was specifically defined at 74% similarity, which also coincided with their genealogy; however, single and three-way crosses remained united.

KEYWORDS: *Zea mays*; anthocyanins; blue corn.

1. INTRODUCCIÓN

El maíz (*Zea mays* L.) es de los cultivos más importantes a nivel mundial (Carvalho *et al.*, 2025) debido a su alto valor nutricional, su versatilidad en la industria agroalimentaria y su relevancia en la seguridad alimentaria de muchos países. En México, el maíz azul ha ganado interés por su contenido en antocianinas, compuestos con propiedades antioxidantes y beneficios potenciales para la salud humana (López-Martínez *et al.*, 2011), esto ha incrementado su consumo y provoca desabasto porque su producción, basada en variedades criollas, es insuficiente.

La formación de híbridos de maíz azul a partir del germoplasma criollo es una opción para elevar el rendimiento de este grano; por ello, en el Programa de Maíz Azul del Campo Experimental Valle de México del Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas, Pecuarias y Forestales se han liberado comercialmente híbridos de rendimientos altos y con adaptación a la región agroecológica de los Valles Altos Centrales de México, con altitudes de 2400 a 2800 msnm, entre ellos se encuentra el híbrido trilineal Vampiro H10, el cual posee características de rendimiento superior a los criollos regionales, color de grano azul intenso y tolerancia a factores ambientales, particularmente a las heladas tempranas y tardías, que son muy frecuentes en esa región.

Para conocer el potencial agronómico de los híbridos señalados, es necesario caracterizar física y genéticamente las semillas, tanto de los genotipos parentales como del híbrido mismo; en el primer caso para estimar su rendimiento, susceptibilidad a insectos y posibilidades de siembra mecanizada (Salinas *et al.*, 2013) y, en el segundo, para identificar fehacientemente a todos los genotipos involucrados en el híbrido, ya sea para incremento de semilla o para fines de certificación de semillas.

En este sentido, la caracterización molecular mediante la amplificación aleatoria del ADN polimórfico anclado por microsatélites (RAMPD, por sus siglas en inglés) permite obtener el perfil genético específico de los materiales genéticos, de modo que se puede aplicar para evaluar la identidad y la pureza genética de semillas; además, proporciona información sobre la diversidad genética y la estabilidad de los híbridos analizados (Fu, 2015).

El objetivo del presente estudio fue generar la huella genómica de los parentales del híbrido de maíz azul Vampiro H10 y relacionarla con las características físicas (peso, anchura, grosor y longitud) de las semillas.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. GENOTIPOS

Se utilizaron semillas de la secuencia de genotipos que conforman al híbrido trilineal de maíz azul Vampiro H10, fueron tres líneas endogámicas (A, B y C), la cruce simple (AxB) y la cruce trilineal [(AxB)xC]. Este híbrido se desarrolló en el Programa de Mejoramiento Genético de Maíz Azul del Campo Experimental Valle de México (CEVAMEX) del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP).

Cuadro 1. Descripción de los tratamientos (genotipos) utilizados en el estudio.

Tratamiento	Genotipo	Genealogía
Líneas		
A	L11	BXCC-54-11-1-1-1
B	L12	BXCC-5-9-6
C	L10	NXOAX-19-5-1-1-2
Cruzas		
D	(L11xL12)	BXCC-54-11-1-1-1)x(BXCC-5-9-6)
E	[(L11xL12)]xL10	[(BXCC- 54-11-1-1-1)x(BXCC-5-9-6)]x(NXO-AX-19-5-1-1-2)

2.2. VARIABLES FÍSICAS EVALUADAS

Las variables físicas de las semillas incluidas en el estudio fueron peso, anchura, grosor y longitud, todas ellas tomadas en cuatro repeticiones de 100 semillas de cada genotipo. Los promedios de estas variables se codificaron mediante la construcción de intervalos según la Regla de Sturges (1926): $K = 1 + 3.3 \log(N)$; donde N es el número total de datos.

Con los valores codificados se elaboró la matriz básica de datos, con la cual se construyeron los dendrogramas mediante el programa NTSYS, se utilizó el coeficiente de similitud de Dice.

2.3. DESARROLLO DE LA HUELLA GENÓMICA MEDIANTE LA AMPLIFICACIÓN ALEATORIA DEL ADN POLIMÓRFICO ANCLADO POR MICROSATÉLITES (RAMPD, POR SUS SIGLAS EN INGLÉS)

Se extrajo el ADN de los embriones de las semillas de los 5 genotipos (tratamientos) mencionados antes por el método Dellaporta y se aplicó el protocolo de la amplificación aleatoria del ADN polimórfico anclado por microsatélites (RAMPD, por sus siglas en inglés) descrito por Durán *et al.* (2011).

Los amplicones obtenidos se codificaron (1 para presencia de banda y 0 para su ausencia) para elaborar la matriz básica de datos, con la cual se elaboraron los dendrogramas en el programa NTSYS, con base en el coeficiente de similitud de Dice.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

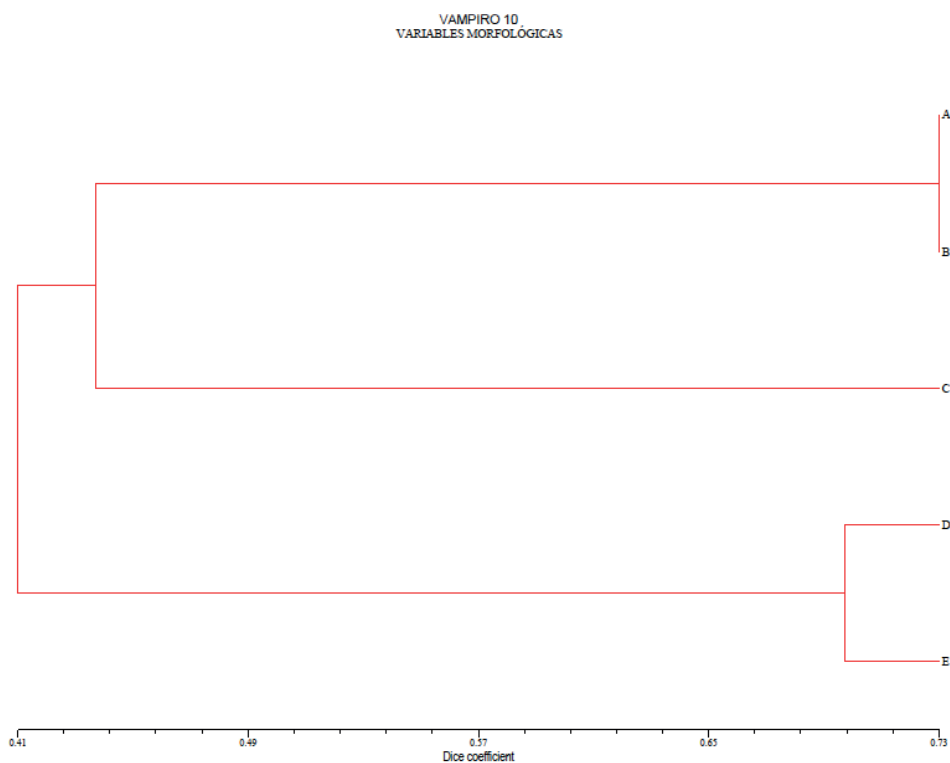
3.1. DENDROGRAMA FÍSICO (MORFOLÓGICO)

La agrupación física de las dimensiones físicas (morfológicas) de las semillas (Figura 1) mostró dos bloques desde el inicio del dendrograma (41 % de similitud), uno aglutinó a las tres líneas y otro a las cruas. Al incrementarse la similitud (43 %), la línea

C se separó de A y B y éstas se mantuvieron unidas hasta el término de ese conjunto del dendrograma físico (73 %). La similitud (semejanza) elevada entre A y B se puede atribuir a que fueron colectadas en la misma región y su genealogía fue cercana, por lo que sus dimensiones morfológicas fueron análogas, aunque diferentes a las de la línea C, cuyo linaje fue distinto (Cuadro 1).

Líneas endogámicas y cruzas carecieron de similitud entre sí desde el inicio mismo del dendrograma (41 %), resultado que se puede atribuir a la heterosis en los tratamientos D y E, cuyos efectos incrementaron las dimensiones de peso, anchura, grosor y longitud de semillas; este comportamiento se demostró en estudios previos (Gutiérrez-Hernández *et al.*, 2024) y se detectó en el análisis de similitud realizado.

Figura 1. Dendrograma físico (morfológico) obtenido para las variables peso, longitud, anchura y espesor de las semillas de los genotipos parentales del Vampiro H 10 (NTSYS, con base en el coeficiente de Dice).



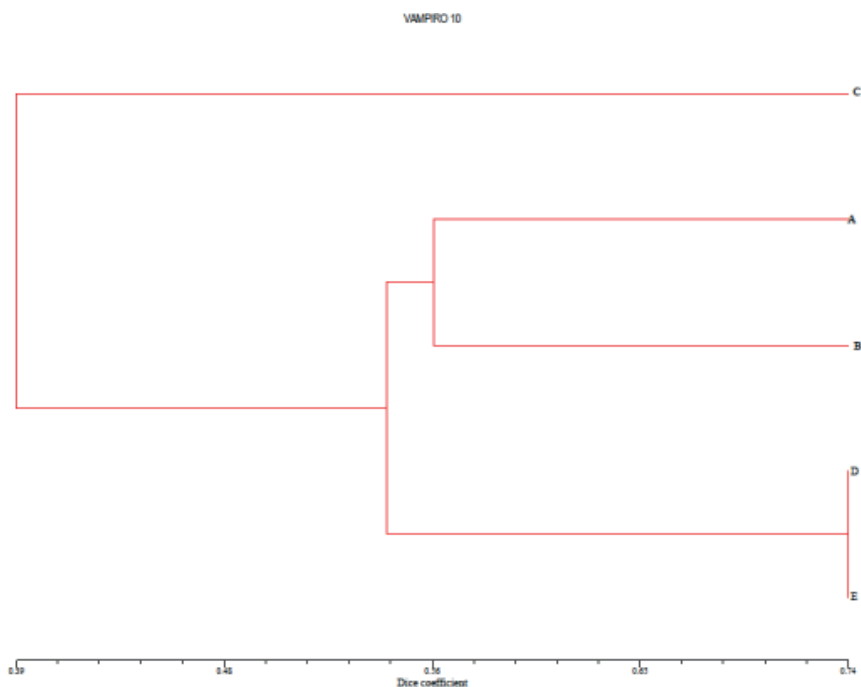
3.2. DENDROGRAMA MOLECULAR

La huella genética obtenida mediante la RAMPD (Figura 2) identificó individualmente a las tres líneas endogámicas (A, B y C), en tanto que las cruas (D y E) permanecieron unidas hasta el término del bloque.

El dendrograma obtenido evidenció las constituciones genotípicas de las líneas (Cuadro 1), esta situación fue más evidente en la C, que se mantuvo sin similaridad con las otras dos líneas debido a su genealogía completamente distinta, mientras que estas dos sí se derivaron de la misma colecta y se situaron en el mismo bloque llegando hasta el 56 % de similitud, valor a partir del cual se separaron.

Las cruza simple (D) y trilineal (E) mantuvieron similaridad alta (74 %) en el dendrograma molecular, esto se explicaría porque comparten gran parte de su genoma, ya que la cruza simple (D) fungió como progenitor femenino y se polinizó con L10 para formar la trilineal (E), que es precisamente el híbrido Vampiro H10.

Figura 2. Dendrograma obtenido para la amplificación aleatoria del ADN polimórfico anclado por microsatélites (RAMPD) de los embriones de las semillas de los genotipos parentales del Vampiro H10 (NTSYS, con base en el coeficiente de Dice).



4. CONCLUSIONES

En los atributos físicos evaluados (peso, anchura, grosor y longitud), el dendrograma distinguió dos grupos en las líneas parentales, uno formado por C y otro por A y B; el primero de ellos al 43 % y el segundo al 73 % de similaridad, este hecho se relacionó estrechamente con la genealogía de las referidas líneas; mientras que, las cruza se diferenciaron (bifurcaron) al 70 % de similaridad.

En el dendrograma molecular se definió específicamente cada línea al 74 % de similitud, esto coincidió también con su genealogía; sin embargo, las cruces simple y trilineal permanecieron unidas.

BIBLIOGRAFÍA

Carvalho, H. J. M., Camillo, G. H. T., Nabeshima, E. H. (2025). Harnessing the agronomic potential, nutritional value, and food applications of creole maize to promote food sovereignty in Latin America. *Plant Foods for Human Nutrition*, 80, 169. <https://doi.org/10.1007/s11130-025-01416-6>

Durán Hernández, D.; Gutiérrez Hernández, G. F.; Arellano Vázquez, J. L.; García Ramírez, E.; Virgen Vargas, J. (2011). Caracterización Molecular y Germinación de Semillas de Maíces Criollos Azules con Envejecimiento Acelerado. *Agronomía Mesoamericana* 22(1): 11 – 20.

Fu, Y. B. (2015). Understanding crop genetic diversity under modern plant breeding. *Theoretical and Applied Genetics*, 128, 2131-2142.

Gutiérrez-Hernández, Germán F.; Arellano-Vázquez, José L.; Ceja-Torres, Luis F.; García-Mendoza, Martín F.; Flores-Gómez, Estela; Vázquez-Lozano, Patricia; Ramírez-Ortega, Francisco A. (2024). Seed quality assessment of the blue corn hybrid Vampiro H 10 (*Zea mays* L.) through its parental genotypes. *Agro Productividad* 17 (11) Supplement: 141-149. ISSN impreso 2448-7546 ISSN digital: 2594-0252. <https://doi.org/10.32854/agrop.v17i11.3127>

López-Martínez, R., Oliart-Ros, R. M., Valerio-Alfaro, G., Lee, C. H., Parkin, K. L., García, H. S. (2011). Antioxidant activity, phenolic compounds and anthocyanins content of eighteen strains of Mexican maize. *LWT - Food Science and Technology*, 44(2), 328–332. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2008.10.010>

Salinas Moreno, Y., Aragón Cuevas, F., Ybarra Moncada, C., Aguilar Villarreal, J., Altunar López, B., Sosa Montes, E. (2013). Caracterización física y composición química de razas de maíz de grano azul/morado de las regiones tropicales y subtropicales de Oaxaca. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 36(1), 23-31.

CAPÍTULO 10

GENÓMICA Y POTENCIAL FISIOLÓGICO DE LAS SEMILLAS DE LOS PARENTALES DEL HÍBRIDO DE MAÍZ AZUL VAMPIRO H10

Data de submissão: 31/05/2026

Data de aceite: 15/06/2026

Patricia Vázquez-Lozano

Instituto Politécnico Nacional
Unidad Profesional Interdisciplinaria de
Biotecnología
Ciudad de México, México
<https://orcid.org/0000-0002-5945-6307>

Germán Fernando Gutiérrez-Hernández

Instituto Politécnico Nacional
Unidad Profesional Interdisciplinaria de
Biotecnología
Ciudad de México, México
<https://orcid.org/0000-0003-3312-3747>

José Luis Arellano-Vázquez

Instituto Nacional de Investigaciones
Forestales, Agrícolas y Pecuarias
Campo Experimental Valle de México
Coatlinchán, Estado de México, México
<https://orcid.org/0000-0002-2231-2940>

Estela Flores-Gómez

Instituto Politécnico Nacional
Unidad Profesional Interdisciplinaria de
Biotecnología
Ciudad de México, México
<https://orcid.org/0000-0002-4634-455X>

Aída Margarita Zamora-Contreras

Instituto Politécnico Nacional
Unidad Profesional Interdisciplinaria de
Biotecnología
Ciudad de México, México
<https://orcid.org/0000-0003-4467-7817>

RESUMEN: El híbrido de maíz azul Vampiro H10, por su rendimiento elevado de grano de color azul, altura de planta y ciclo biológico, es una opción para productores de maíz pigmentado en los Valles Altos de México. Para la producción y certificación de semillas de este híbrido es necesario conocer la calidad genética y fisiológica de las semillas de los genotipos que lo conforman. El objetivo de este trabajo fue obtener la huella genética y estimar el potencial fisiológico de las semillas de las líneas y cruzas (simple y trilineal) que integran al híbrido de maíz azul Vampiro H10. Se obtuvo la huella genómica con la técnica de la amplificación aleatoria anclada por microsatélites del ADN polimórfico (RAMPD) y se evaluaron plántulas normales, plántulas anormales, longitud de plúmula, radícula y total y peso seco de plúmula, radícula y total. Ambos grupos de variables se codificaron y se construyeron los dendrogramas respectivos con el programa NTSYS, con base en el coeficiente de similitud de Dice. Se obtuvieron huellas genómicas robustas para los genotipos parentales del híbrido de maíz azul Vampiro

H10, las líneas ocuparon nodos específicos separados de las cruces simple y trilineal; se identificó individualmente a las tres líneas parentales y las cruces simple y trilineal no se separaron. En el dendrograma fisiológico las tres líneas parentales se posicionaron en un nodo desde el 43 % de similitud; al término del cual (45 %) se mantuvo la similitud entre las líneas L10 y L11, pero se separó L12. Esto indicó que el potencial fisiológico (capacidad para formar plántulas normales, crecer en longitud y acumular materia seca) de las primeras dos líneas fue equivalente entre ellas y distinto de la última línea mencionada. Se evidenció que la aportación del tercer parental (L10) del Vampiro H10 al potencial fisiológico de la cruce simple fue significativa.

PALABRAS CLAVE: *Zea mays*; germinación; huella genómica; identidad genética.

GENOMICS AND PHYSIOLOGICAL POTENTIAL OF THE SEEDS OF THE PARENTAL LINES OF THE BLUE CORN HYBRID VAMPIRO H10

ABSTRACT: The blue corn hybrid Vampiro H10, due to its high yield of blue-colored grain, plant height, and life cycle, is an option for producers of pigmented corn in the Mexican Highlands. For the production and certification of this hybrid's seeds, it is necessary to determine the genetic identity and physiological quality of the seeds from the parental genotypes that constitute it. The aim of this work was to obtain the genetic fingerprint and estimate the physiological potential of the seeds of the lines and crosses (single and three-way crosses) that make up the Vampiro H10 blue corn hybrid. The genomic fingerprint was obtained using the random amplification of polymorphic DNA anchored by microsatellites (RAMPD) technique, and normal seedlings, abnormal seedlings, plumule length, radicle length, total length, and dry weight of plumule, radicle, and total were evaluated. Both groups of variables were coded, and the respective dendrograms were constructed with the NTSYS program, based on Dice similarity coefficient. Robust genomic fingerprints were obtained for the parental genotypes of the blue maize hybrid Vampiro H10. The lines occupied specific nodes separate from the single and three-way crosses; the three parental lines were individually identified, while the single and three-way crosses were not separated. In the physiological dendrogram, the three parental lines were positioned at a node from 43% similarity; at the end of which (45%) the similarity between lines L10 and L11 was maintained, but L12 separated. This indicated that the physiological potential (ability to form normal seedlings, grow in length, and accumulate dry matter) of the first two lines was equivalent to each other and different from the last-mentioned line. It was evidenced that the contribution of the third parent (L10) of Vampiro H10 to the physiological potential of the single cross was significant.

KEYWORDS: *Zea mays*; germination; genomic fingerprint; genetic identity.

1. INTRODUCCIÓN

En México se cosecharon 27 millones de toneladas de grano de maíz en el 2024, por lo que se ubicó en el quinto lugar de los países productores de este cereal (CAMPEAR, 2024). Predomina el cultivo de maíz de grano de color blanco (92 %); mientras que, los amarillos, rojos o azules, entre otros, tienen una aportación escasa (INIFAP, 2020). En

los Valles Altos Centrales de México, región que abarca los estados de Puebla, Tlaxcala, México e Hidalgo, se cultivan alrededor de un millón 500 mil hectáreas de maíz, de las cuales 85 % se siembran en condiciones de temporal (secano); de esta superficie, 150 mil hectáreas corresponden a maíz pigmentado (rojo, azul, rosado) y se cosechan 300 mil toneladas de grano, principalmente de color azul (Miguel *et al.*, 2003).

El maíz azul es relevante por ser un componente destacado en la identidad cultural y en la gastronomía tradicional de los mexicanos, su impacto inició en la agricultura de subsistencia y actualmente es relevante en mercados especializados por sus propiedades nutricionales y funcionales.

En México existe amplia diversidad de maíz azul, la cual se manifiesta en las plantas y el grano; en éste, la variabilidad se presenta en peso, color, tamaño, dureza, densidad, composición química (Agama *et al.*, 2011; Salinas-Moreno *et al.*, 2012). También, cuando se trata de semillas, existe una gama amplia de posibilidades en el potencial germinativo.

El maíz azul contiene antocianinas, pigmento natural que ocasiona el color azul en las semillas. Las antocianinas son compuestos flavonoides con propiedades antioxidantes que contribuyen a reducir los radicales libres en el organismo y su ingesta se asocia con la prevención de enfermedades crónicas como diabetes, padecimientos cardiovasculares y ciertos tipos de cáncer.

En los últimos años, la demanda de productos derivados del maíz azul se ha incrementado debido a la preferencia de los consumidores por alimentos funcionales y de origen natural. Se estima que la demanda actual de maíz azul es de 500 mil toneladas en la región de Valles Altos (Arellano *et al.*, 2025) y sigue en ascenso dada su utilización en la producción de harinas, tortillas, botanas y bebidas con valor agregado y su comercialización en mercados especializados. Además, su cultivo representa beneficios económicos para los productores, ya que su precio es 40 % más elevado al de otros tipos de maíz debido a su valor nutracéutico y su empleo en la gastronomía gourmet.

Por lo anterior, el consumo de maíz azul se ha incrementado sensiblemente y hay desabasto, por lo que es preciso elevar los rendimientos unitarios y una de las opciones es desarrollar híbridos que superen en rendimiento a los maíces criollos, sobre los cuales se sustenta actualmente la producción de maíz azul.

Se considera que mediante el cultivo de maíces híbridos es factible incrementar hasta 50 % los rendimientos de grano de maíz azul (Arellano *et al.*, 2025); por ello, en el Programa de Mejoramiento Genético de Maíz de Azul del Campo Experimental Valle de México del Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas, Pecuarias y Forestales, se conformaron varios híbridos, entre ellos el denominado Vampiro H10.

Para la adopción de estos materiales genéticos por parte de los productores, es conveniente disponer del conocimiento del potencial fisiológico y de la identidad genética de las semillas de los híbridos mencionados, por lo que el objetivo del estudio aquí presentado fue desarrollar la huella genómica de la secuencia de genotipos parentales del híbrido trilineal de maíz azul Vampiro H10, así como estimar su repercusión en el potencial fisiológico de las semillas.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. GENOTIPOS

Se utilizaron semillas de la secuencia de genotipos que conforman al híbrido trilineal de maíz azul Vampiro H10, fueron tres líneas endogámicas (A, B y C), la cruce simple (AxB) y la cruce trilineal [(AxB)xC]. Este híbrido se desarrolló en el Programa de Mejoramiento Genético de Maíz Azul del Campo Experimental Valle de México (CEVAMEX) del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), sito en Coatlinchán, estado de México.

Cuadro 1. Descripción de los tratamientos (genotipos) utilizados en el estudio.

Tratamiento	Genotipo	Genealogía
Líneas		
A	L11	BXCC-54-11-1-1-1
B	L12	BXCC-5-9-6
C	L10	NXOAX-19-5-1-1-2
Cruzas		
D	(L11xL12)	(BXCC-54-11-1-1-1)x(BXCC-5-9-6)
E	[(L11xL12)]xL10	[(BXCC-54-11-1-1-1)x(BXCC-5-9-6)]x(NXO-AX-19-5-1-1-2)

2.2. GENÓMICA

Se desarrolló la huella genómica mediante la amplificación aleatoria del ADN polimórfico anclado por microsatélites (RAMPD, siglas en inglés). Se extrajo el ADN de los embriones de las semillas de los 5 genotipos (tratamientos) mencionados (Cuadro 1) por el método descrito por el CIMMYT (2006) y se aplicó el protocolo de la amplificación aleatoria del ADN polimórfico anclado por microsatélites (RAMPD, siglas en inglés) descrito por Durán *et al.* (2011).

Los amplicones obtenidos se codificaron (1 para presencia de banda y 0 para su ausencia) para elaborar la matriz básica de datos, con la cual se elaboraron los dendrogramas en el programa NTSYS, con base en el coeficiente de similitud de Dice.

2.3. POTENCIAL FISIOLÓGICO

Las variables fisiológicas de las semillas incluidas en este concepto fueron plántulas normales, plántulas anormales, longitud de plúmula, de radícula y la total, peso seco de plúmula, de radícula y el total, todas ellas tomadas en promedio de cuatro repeticiones de 100 semillas de cada genotipo. Estas variables también se codificaron mediante la construcción de intervalos según la Regla de Sturges (1926): $K = 1 + 3.3 \log(N)$, donde N es el número total de datos y se elaboró la matriz básica de datos para construir los dendrogramas en el programa NTSYS, con base en el coeficiente de similitud de Dice.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

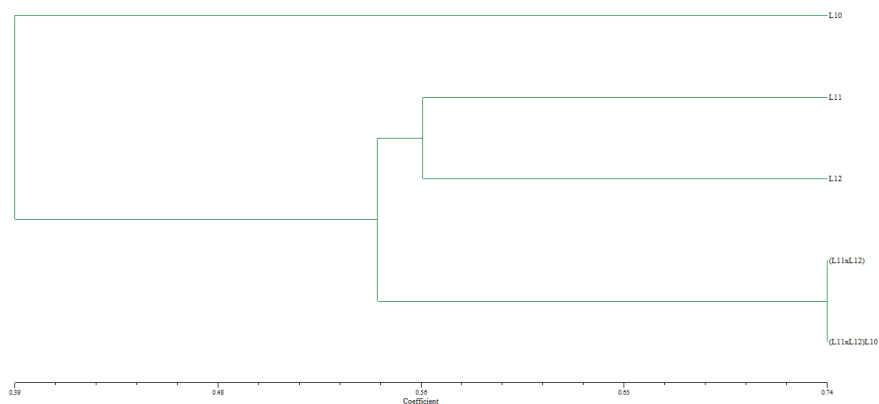
3.1. GENÓMICA DE LOS PARENTALES DEL VAMPIRO H10

La huella genética obtenida mediante la RAMPD (Figura 1) identificó individualmente a las tres líneas endogámicas (A, B y C), en tanto que las cruza (D y E) permanecieron unidas hasta el término del bloque.

El dendrograma obtenido evidenció las constituciones genotípicas de las líneas (Cuadro 1), esta situación fue más evidente en la C, que se mantuvo sin similitud con las otras dos líneas debido a su genealogía completamente distinta, mientras que estas dos sí se derivaron de la misma colecta y se situaron en el mismo bloque llegando hasta el 56 % de similitud, valor a partir del cual se separaron.

Las cruza simple (D) y trilineal (E) mantuvieron similitud alta (74 %) en el dendrograma molecular, esto se explicaría porque comparten gran parte de su genoma, ya que la crusa simple (D) fungió como progenitor femenino y se polinizó con L10 para formar la trilineal (E), que es precisamente el híbrido Vampiro H10.

Figura 1. Dendrograma desarrollado a partir de la amplificación aleatoria anclada del ADN polimórfico (RAMPD) de las semillas, mediante el programa NTSYS y con base en el coeficiente de Dice.



En el dendrograma para las variables fisiológicas (Figura 2), las tres líneas parentales se posicionaron en un bloque desde el 43 % de similitud; al término de dicho bloque (45 %), se mantuvo la similitud entre las líneas L10 y L11, pero se separó L12. Esto indicó que el potencial fisiológico (capacidad para formar plántulas normales, crecer en longitud y acumular materia seca) de las primeras dos líneas fue análogo, pero distinto de la última línea mencionada. A diferencia de lo que ocurrió en el perfil molecular, donde los parentales se articularon por similitud según su genealogía, en el potencial fisiológico esos genotipos se clasificaron por sus aptitudes para germinar y para el establecimiento de las plántulas.

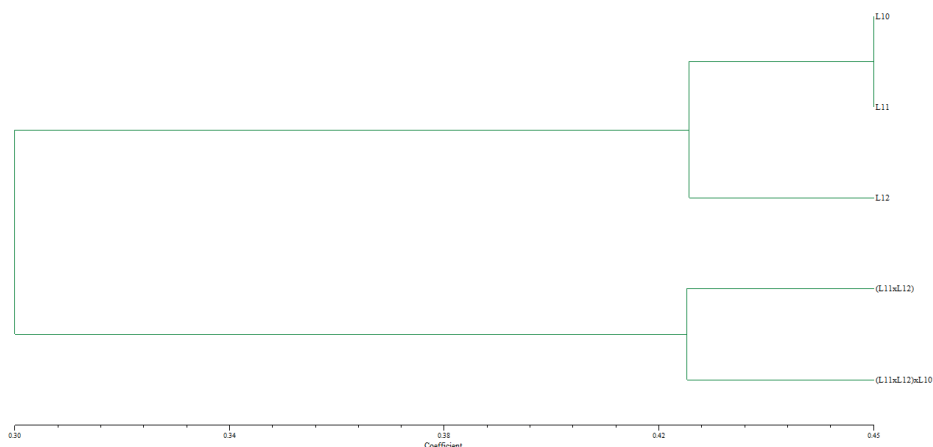
Las cruzas formaron un nodo desde el 30 % de similitud, valor al cual se desvincularon de las líneas, al incrementarse la comparación por similitud y llegar al 45 %, ambas cruzas se diferenciaron.

Este comportamiento se puede atribuir a que en ambas cruzas se incrementó la capacidad fisiológica de las semillas por la manifestación de la heterosis, circunstancia ya documentada para el Vampiro H10 (Gutiérrez-Hernández et al., 2024).

Precisamente a consecuencia de la heterosis cambiaron las características fisiológicas de las semillas, tales como la formación de plántulas normales y de biomasa y longitud en las plántulas; por lo tanto, fueron diferentes ambas cruzas (L11xL12) y [(L11xL12)xL10]) de las líneas que las conformaron.

En el mismo sentido, en el dendrograma fisiológico sí se diversificaron (43 %) las cruzas simple y trilineal, esto evidenció que la aportación del tercer parental del Vampiro H10 (L10) al potencial fisiológico de la cruce simple (D) fue significativa (Gutiérrez-Hernández *op. cit.*).

Figura 2. Dendrograma desarrollado para el potencial fisiológico de las semillas (plántulas normales, anormales y longitud y peso seco de plúmula, radícula y total), mediante el programa NTSYS y con base en el coeficiente de Dice.



4. CONCLUSIONES

Se obtuvieron huellas genómicas robustas para los genotipos parentales del híbrido de maíz azul Vampiro H10. En ellas, las líneas ocuparon nodos específicos separados de las cruza simple y trilineal. Se identificó individualmente a las tres líneas parentales, en tanto que las cruza simple y trilineal no se separaron.

En el dendrograma fisiológico las tres líneas parentales se posicionaron en un nodo desde el 43 % de similitud; al término del cual (45 %), se mantuvo la similitud entre las líneas L10 y L11, pero se separó L12. Esto indicó que el potencial fisiológico (capacidad para formar plántulas normales, crecer en longitud y acumular materia seca) de las primeras dos líneas fue equivalente entre ellas y distinto de la última línea mencionada. Se evidenció que la aportación del tercer parental (L10) del Vampiro H10 al potencial fisiológico de la cruza simple fue significativa.

BIBLIOGRAFÍA

Agama, A. E., Salinas, M. Y., Pacheco, V. G., y Bello, P. L. A. (2011). Características físicas y químicas de dos razas de maíz azul: morfología del almidón. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 2(3), 317-329.

Arellano-Vázquez, J.L.; Fernández-Sosa, R.; Rojas-Martínez, I. (2025). Chimpancé H14 híbrido de maíz azul con madurez tardía y grano semicristalino para Texcoco y Otumba, Estado de México y Apan, Hidalgo. Memoria 4 Congreso interamericano de agua, suelo y agrobiodiversidad. Ciudad de México, México. ISSN: 2992-8168.

CAMPEAR. (2024). DATA DE CAMPO NOTICIAS DEL AGRO (16 de agosto de 2024). *Maíz: cuáles son los 10 máximos productores a nivel mundial*. Obtenido de datadecampo.com: <https://datadecampo.com/agricultura/maiz-10-productoresmundial/#:~:text=El%20listado%20completo%20de%20los%20m%C3%A1ximos%20productores%20de,23%2C%20mt%208%20Francia%3A%2017%2C5%20mt%20M%C3%A1s%20elementos>. Consultado en marzo 2025.

CIMMYT. (2006). Protocolos de laboratorio: Laboratorio de Genética Molecular Aplicada del CIMMYT. 3 ed. México, D.F. 100 pp.

Durán Hernández, D.; Gutiérrez Hernández, G. F.; Arellano Vázquez, J. L.; García Ramírez, E.; Virgen Vargas, J. 2011. Caracterización Molecular y Germinación de Semillas de Maíces Criollos Azules con Envejecimiento Acelerado. *Agronomía Mesoamericana* 22(1): 11 – 20.

Gutiérrez-Hernández, Germán F.; Arellano-Vázquez, José L.; Ceja-Torres, Luis F.; García-Mendoza, Martín F.; Flores-Gómez, Estela; Vázquez-Lozano, Patricia; Ramírez-Ortega, Francisco A. (2024). Seed quality assessment of the blue corn hybrid Vampiro H 10 (*Zea mays* L.) through its parental genotypes. *Agro Productividad* 17 (11) Supplement: 141-149. ISSN impreso 2448-7546 ISSN digital: 2594-0252. <https://doi.org/10.32854/agrop.v17i11.3127>

INIFAP (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias). (2020). *Maíz azul: coloreando nuestras tradiciones*. Obtenido de www.gob.mx: <https://www.gob.mx/inifap/es/articulos/maiz-azul-coloreando-nuestras-tradiciones?idiom=es>. (Consultado en marzo 2025).

Miguel, M.A.; Arellano V, J.L.; García, G.; Miranda, S.; Apolinar, M.J.; Felix, G.V. (2003). Variedades criollas de maíz azul raza chalqueño. Características agronómicas y calidad de semilla. *Revista Fiotecnia Mexicana*. 27 (1): 9-15.

Salinas-Moreno, Y., Pérez-Alonso, J. J., Vázquez-Carrillo, G., Aragón-Cuevas, F., y Velázquez-Cardelas, G. A. (2012). Antocianinas y actividad antioxidante en maíces (*Zea mays* L.) de las razas Chalqueño, Elotes Cónicos y Bolita. *Agrociencia*, 47(8), 815-825.

CAPÍTULO 11

ACEITES ESENCIALES Y ÁCIDOS ORGÁNICOS: ALTERNATIVA A LOS ANTIBIÓTICOS COMO PROMOTORES DE CRECIMIENTO EN LOS CERDOS

Data de submissão: 09/05/2026

Data de aceite: 26/05/2026

Elmer Bonilla-Valverde

Estudiante de Doctorado en
Ciencia Agropecuarias de la
Facultad de Medicina
Veterinaria y Zootecnia de la
Universidad Autónoma de
Sinaloa (FMVZ-UAS)
Culiacán, Sinaloa, México
<https://orcid.org/0000-0002-8381-8777>

Juan Manuel Romo-Valdez

Profesor e Investigador de
Tiempo completo de la
FMVZ-UAS
Culiacán, Sinaloa, México
<https://orcid.org/0000-0002-0520-9968>

Jesús José Portillo-Loera

Profesor e Investigador de
Tiempo completo de la
FMVZ-UAS
Culiacán, Sinaloa, México
<https://orcid.org/0000-0002-5990-7841>

Ana Mireya Romo-Valdez

Profesora de Tiempo Parcial de la
FMVZ-UAS
Culiacán, Sinaloa, México
<https://orcid.org/0000-0002-9424-3235>

Laura Francisca Espinoza-Aguirre

Estudiante de Doctorado en
Ciencia Agropecuarias de la
FMVZ-UAS
Culiacán, Sinaloa, México
<https://orcid.org/0000-0002-7300-7364>

Javier Alonso Romo-Rubio¹

Profesor e Investigador de
Tiempo completo de la
FMVZ-UAS
Culiacán, Sinaloa, México
<https://orcid.org/0000-0002-2364-2554>

RESUMEN: Con el objetivo de documentar e informar sobre el uso alternativo de los aceites esenciales y ácidos orgánicos como promotores de crecimiento en cerdos, en sustitución de los antibióticos, se realizó una revisión bibliográfica. La información analizada indica que los antibióticos se utilizan con el fin de contrarrestar el crecimiento de poblaciones bacterianas patógenas a nivel intestinal para un mejor rendimiento productivo de los lechones durante el período lactancia, posdestete y engorda. Sin embargo, en algunos países se ha restringido o incluso prohibido el uso de antibióticos como promotores del crecimiento por la creciente preocupación de transmisión y proliferación de bacterias resistentes a través de la cadena

¹ Autor de correspondencia. Fraccionamiento San Benito, Culiacán Rosales, Sinaloa, México; CP 80246.

alimentaria. Los aceites esenciales (AE) y ácidos orgánicos (AO) se han propuesto como alternativa a los antibióticos promotores del crecimiento. En particular, la combinación de cinamaldehído y AO se presenta como una estrategia prometedora para mejorar la productividad, la salud intestinal y la sostenibilidad en la producción porcina. Sin embargo, el éxito de esta estrategia depende de diferentes factores, como una dosificación correcta, así como un manejo adecuado de la alimentación. Las futuras investigaciones deberán enfocarse en la optimización de la dosis y la búsqueda de nuevas combinaciones sinérgicas para maximizar sus beneficios.

PALABRAS CLAVE: rendimiento productivo; integridad intestinal; actividad antimicrobiana; aceites esenciales; ácidos orgánicos.

ESSENTIAL OILS AND ORGANIC ACIDS: AN ALTERNATIVE TO ANTIBIOTICS AS GROWTH PROMOTERS IN PIGS

ABSTRACT: With the aim of documenting and reporting on the alternative use of essential oils and organic acids as growth promoters in pigs, as a replacement for antibiotics, a literature review was conducted. The analyzed information indicates that antibiotics are used to counteract the growth of pathogenic bacterial populations in the gut to improve the productive performance of piglets during the lactation, post-weaning, and finishing periods. However, in some countries, the use of antibiotics as growth promoters has been restricted or even prohibited due to the growing concern about the transmission and proliferation of resistant bacteria through the food chain. Essential oils (EOs) and organic acids (OAs) have been proposed as alternatives to antibiotic growth promoters. In particular, the combination of cinnamaldehyde and OAs presents itself as a promising strategy to improve productivity, gut health, and sustainability in pig production. However, the success of this strategy depends on various factors, such as correct dosage and proper feed management. Future research should focus on optimizing dosage and exploring new synergistic combinations to maximize benefits.

KEYWORDS: production performance; intestinal integrity; antimicrobial activity; essential oils; organic acids.

1. INTRODUCCIÓN

Los antibióticos promotores del crecimiento se utilizaron por primera vez como aditivos alimentarios para prevenir el estrés resultante del cambio de alimento en la dieta (Liu *et al.*, 2018); se utilizan con el fin de contrarrestar el crecimiento de poblaciones bacterianas patógenas a nivel intestinal, para garantizar una mejor salud del intestino y rendimiento productivo de los lechones durante el período posdestete (Kogut *et al.*, 2017; Salim *et al.*, 2018). Sin embargo, la creciente preocupación por el uso a largo plazo, y en aumento, de antibióticos promotores del crecimiento en la producción animal dio lugar a un cambio hacia el uso de alternativas orgánicas naturales para impulsar el crecimiento de los cerdos, como los AE vegetales y los AO (Long *et al.*, 2018). Muchos países (UE, USA, Canadá; Costa *et al.*, 2017) han restringido o incluso prohibido el uso de antibióticos como

aditivos en el alimento por la creciente preocupación en la transmisión y proliferación de bacterias resistentes a través de la cadena alimentaria (Liu *et al.*, 2018; Yang *et al.*, 2019; Molina, 2019, WOA, 2023), lo que puede poner en riesgo la salud humana. Lo anterior, trajo consigo consecuencias desfavorables en términos de productividad, bienestar y salud de los animales, principalmente a causa de la aparición de alteraciones fisiológicas estrechamente relacionadas con desequilibrios en el microbioma normal del intestino, lo cual se reflejó en el detrimento del rendimiento productivo (Costa *et al.*, 2017). Frente a este panorama, es necesario buscar alternativas eficaces y biológicamente seguras que garanticen un buen rendimiento productivo mientras se protege la salud del consumidor (Sugiharto, 2016; Mehdi *et al.*, 2018). El uso de AE se considera una alternativa al uso de los antibióticos y promotores del crecimiento sintéticos, con potencial para ofrecer beneficios a la salud, optimizar la ganancia de peso, el comportamiento reproductivo y la producción de carne (Toso *et al.*, 2023). Con base en sus propiedades antimicrobianas, antiinflamatorias y antioxidantes, los AE se utilizan ampliamente como medicina tradicional para mejorar la salud, curar enfermedades en humanos y conservar alimentos (Sakkas & Papadopoulou, 2017). El cinamaldehído, como componente principal de los AE de la Canela (*Cinnamomum*), representa entre el 85.3 y 90.5% de estos (Shreaz *et al.*, 2016); su uso como aditivo alimenticio inhibe eficazmente el crecimiento de una variedad de microorganismos como bacterias, mohos y levaduras, así como la producción de toxinas por parte de éstos (Friedman, 2017).

Por otra parte, los AO forman parte de los constituyentes normales de plantas y tejidos animales; también, se producen por síntesis química o fermentación microbiana de carbohidratos en el intestino grueso (Hajati, 2018); se han utilizado durante mucho tiempo para apoyar el crecimiento de los cerdos, especialmente al destete, y más recientemente se han convertido en una alternativa como promotores del crecimiento en los cerdos (Tugnoli *et al.*, 2020). La naturaleza lipófila de los AO débiles les permite ingresar fácilmente a la membrana plasmática y reducir el pH del interior de la célula, lo que conduce a la muerte de la bacteria (Wang *et al.*, 2013). Los AO tienen una mayor eficacia que los AE contra las bacterias Gram negativas (Gram-; Mahmoud, 2014). Satterlee *et al.* (2023), observaron que el AE de canela mostró sinergia con los AO (acético, propiónico y butírico), lo que puede permitir el uso de una dosis reducida como aditivo alimenticio debido a sus efectos sinérgicos. Liu *et al.* (2018), observaron que los AE y los AO mejoran la capacidad de los cerdos para evitar la colonización de bacterias patógenas en el intestino, mejoran la utilización de minerales, actúan como fuente de energía, estimulan la secreción de enzimas endógenas y optimizan la inmunidad y la estabilidad antioxidante.

La presente revisión tiene como objetivo informar sobre el uso de cinamaldehído y ácidos orgánicos como promotores del crecimiento en cerdos.

2. COMPUESTOS ALTERNATIVOS A LOS ANTIBIÓTICOS COMO PROMOTORES DE CRECIMIENTO EN LOS CERDOS

Los antibióticos promotores de crecimiento son perjudiciales para la salud humana porque los genes de resistencia a múltiples fármacos pueden transferirse horizontalmente de bacterias no patógenas a patógenas, lo que resulta en la transferencia directa de bacterias resistentes a los antibacterianos de animales a humanos (Han *et al.*, 2018). Además, los antibióticos promotores de crecimiento no son ecológicos, ya que sus residuos contaminan el suelo y el agua, lo que impacta negativamente el ecosistema y sus funciones (Kuppusamy *et al.*, 2018).

Se ha informado que los promotores de crecimiento alternativos, como los AE y los AO, mejoran la capacidad de los cerdos para inhibir la colonización del intestino por bacterias patógenas (Liu *et al.*, 2018). Los AE son una mezcla de diversos compuestos, principalmente terpenos y derivados de terpenos (Figura 1). Son líquidos hidrofóbicos concentrados que contienen compuestos aromáticos volátiles producidos por las plantas y almacenados en cavidades, células secretoras y células epidérmicas. Los factores ecológicos, las especies, las condiciones climáticas, el momento de la cosecha, la parte de la planta utilizada y el método de extracción afectan la composición química de los AE y su eficacia (Lan *et al.*, 2016). Los AE se producen como metabolitos secundarios y poseen propiedades antibacterianas, antifúngicas y antivirales (Zeng *et al.*, 2015). Los compuestos activos presentes en los AE evitan el desarrollo de estructuras virulentas en las bacterias, y los compuestos activos alteran el sistema enzimático de éstas y bloquean su virulencia (Liu *et al.*, 2018). Las propiedades hidrofóbicas de los AE les permite separar los lípidos presentes en la membrana celular de las bacterias y las mitocondrias, haciéndola más permeable, a la vez que alteran la estructura celular (Tariq *et al.*, 2019). Además, poseen un olor intenso que hace que el alimento sea atractivo, y los cerdos tienden a consumir alimento con mayor frecuencia o en mayor cantidad en cada comida (Han *et al.*, 2018).

Estudios sobre AO han demostrado que son benéficos y mejoran la digestión de nutrientes. El ácido fórmico y sus sales reducen el pH del tracto gastrointestinal, lo que aumenta la actividad de las enzimas digestivas (Tariq *et al.*, 2019). El ácido cítrico mejora la digestibilidad aparente total de la proteína, el calcio y el fósforo en las cerdas (Choi *et al.*, 2020). El ácido benzoico, en la dieta, mejora la digestibilidad aparente del calcio y el fósforo en cerdos en crecimiento, así como la de la proteína cruda en lechones

destetados; también, las cerdas alimentadas con dietas adicionadas con ácido benzoico presentaron un alto coeficiente de digestibilidad de la materia orgánica, el extracto etéreo, la proteína y la fibra cruda (Resende *et al.*, 2020). También se ha observado, que la suplementación dietética con mezclas de ácidos protegidos aumentó la digestibilidad de la materia seca, el nitrógeno y la energía en cerdas lactantes (Pluske *et al.*, 2021). Además, mejoran la utilización de minerales, actúan como fuente de energía, promueven la secreción de enzimas endógenas, mejoran la inmunidad y la estabilidad antioxidante (Liu *et al.*, 2018). Se ha observado que la mejora del rendimiento porcino, por el uso de AE y AO como aditivos alimenticios, es comparable a la de los antibióticos promotores del crecimiento (Pateiro *et al.*, 2018; Zhai *et al.*, 2018).

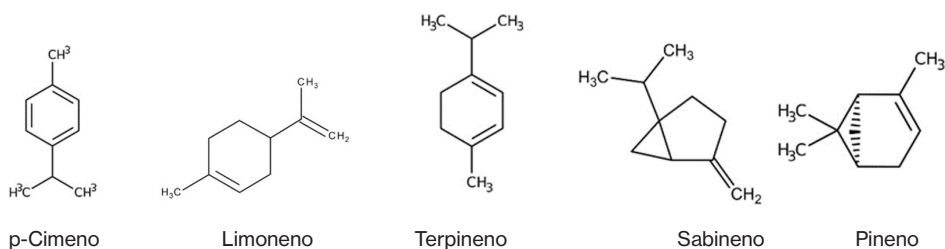
3. COMPONENTES DE LOS ACEITES ESENCIALES

Los AE son líquidos hidrofóbicos, altamente concentrados, derivados de una variedad de plantas y definidos en función de sus propiedades químicas y físicas (Masyita *et al.*, 2022); contienen compuestos volátiles y no volátiles (Aziz *et al.*, 2018). La composición química de los AE incluye compuestos fenólicos, terpenos, terpenoides, fenilpropanoides y otros constituyentes alifáticos y aromáticos, generalmente de composición compleja, obtenidos a partir de materia vegetal por destilación al vapor, destilación seca o un proceso mecánico adecuado sin calentamiento (Hoffmann, 2020; Neagu *et al.*, 2023).

Los AE han mostrado tener propiedades antimicrobianas, antioxidantes, antiparasitarias, antiinflamatorias, antidiarreicas y antimicóticas; mejoran la conversión alimenticia, estimulan enzimas digestivas y dan mejor sabor a los alimentos (Gheisar & Kim, 2017); en las especies pecuarias se ha demostrado sus beneficios para mejorar la digestibilidad, conversión alimenticia y productividad de los animales, así como su efecto antioxidante y antiparasitario, que los hace una alternativa viable al uso de aditivos y fármacos (Martínez *et al.*, 2015). Estos compuestos tienen un mayor efecto contra bacterias Gram positivas (Gram+), porque la entrada de compuestos hidrofóbicos a través de las estructuras de lipopolisacáridos de las bacterias Gram- está limitada, debido a su membrana externa que recubre la pared celular (Azhdarzadeh & Hojjati, 2016). Se han propuesto diferentes formas de acción antimicrobiana, como provocar el mal funcionamiento de la membrana celular, la inhibición de la síntesis o expresión de ADN/ARN, o la interferencia con la detección del *quórum* al interrumpir la comunicación celular; también se ha documentado que algunos fito compuestos inhibieron la producción de toxinas bacterianas (Arrigoni *et al.*, 2024).

3.1. TERPENOS

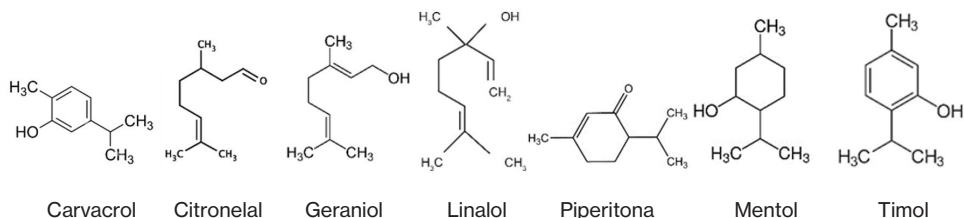
Los terpenos pertenecen al grupo más grande de metabolitos secundarios de las plantas, son hidrocarburos simples (Perveen, 2021). Éstos, se producen a partir de la combinación de varias unidades de isopreno, lo que les confiere una estructura hidrocarbonada. Son sintetizados en el citoplasma de las células vegetales a través del ácido mevalónico a partir del acetyl-CoA (Hyldgaard *et al.*, 2012). Poseen una columna vertebral de hidrocarburos que puede ser reorganizada en estructuras cíclicas por las ciclasas para formar estructuras monocíclicas o bicíclicas (Caballero *et al.*, 2003). Entre los principales terpenos se encuentran los monoterpenos ($C_{10}H_{16}$) y los sesquiterpenos ($C_{15}H_{24}$), aunque, también existen cadenas más largas como los diterpenos ($C_{20}H_{32}$), sestercoipenos ($C_{25}H_{40}$), los triterpenos ($C_{30}H_{40}$) y los meroterpenos; algunos ejemplos de monoterpenos son el p-cimeno, el limoneno, el terpineno, el sabineno y el pineno (Hyldgaard *et al.*, 2012; Perveen, 2021). Se ha indicado, que los terpenos ejercen actividades antimicrobianas contra las bacterias susceptibles y resistentes a los antibióticos, especialmente a través de su capacidad para producir la ruptura celular y la inhibición de la síntesis de proteínas y ADN (Álvarez-Martínez *et al.*, 2021). A continuación, se muestran estructuras químicas de algunos de los AE del grupo de los terpenos.



3.2. TERPENOIDES

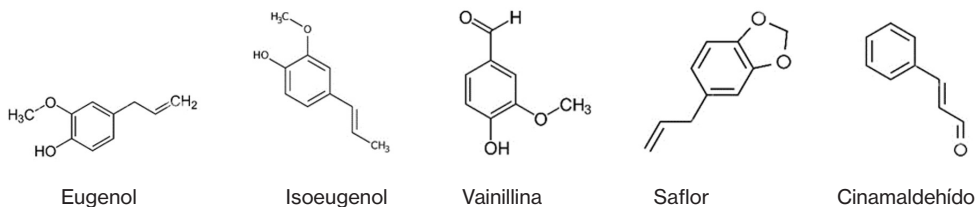
Los terpenoides son un tipo de terpenos que experimentan modificaciones bioquímicas a través de enzimas que añaden moléculas de oxígeno, eliminan o adicionan grupos metilo (Caballero *et al.*, 2003; Pandey *et al.*, 2017). La mayoría de los terpenoides son biológicamente activos y se utilizan para el tratamiento de muchas enfermedades (Perveen, 2021); se pueden agrupar en alcoholes, aldehídos, ésteres, éter, epóxidos, cetonas y fenoles; algunos ejemplos de terpenoides son el carvacrol, citrionelal, geraniol, linalol, acetato de linalilo, piperitona, mentol y timol (Hyldgaard *et al.*, 2012). La mayoría de los terpenoides deben su acción antimicrobiana a los grupos funcionales hidroxilo, fenólicos y a la presencia de electrones deslocalizados; estos elementos son importantes

para su acción antimicrobiana (Nazzaro *et al.*, 2013). Los monoterpenoides más activos, identificados hasta ahora, son el carvacrol y el timol (Hyldgaard *et al.*, 2012). A continuación, se muestran estructuras químicas de algunos de los AE del grupo de los terpenoides.



3.3. FENILPROPENOS

Los fenilpropanoides se sintetizan por la vía del ácido shikímico y se denominan así por contener un grupo fenol aromático de seis carbonos y una cola de propeno de tres carbonos que procede del ácido cinámico, y se origina durante el primer paso de la biosíntesis de los fenilpropanoides (Nazzaro *et al.*, 2013; Stevanovic *et al.*, 2020). Estos compuestos, representan una fracción relativamente pequeña de los AE; entre los compuestos más estudiados de esta fracción están el eugenol, el isoeugenol, la vainillina, el safrol y el cinamaldehído (Hyldgaard *et al.*, 2012). Gill & Holley (2004), observaron que la aplicación de eugenol y cinamaldehído a concentraciones bactericidas producen un rápido efecto sobre las bacterias; el cinamaldehído, al utilizarse contra *E. coli* y *S. Typhimurium* muestra una actividad similar a la del timol y el carvacrol, considerados los AE más potentes (Helander *et al.*, 1998). A continuación, se muestran estructuras químicas de algunos de los AE del grupo de los fenilpropanoides.



4. EFECTO DE LOS ACEITES ESENCIALES EN LA SALUD ANIMAL

Los AE se han utilizado en medicina como agentes antimicrobianos, antivirales, antiinflamatorios, digestivos, carminativos, antipiréticos, antitusivos, antisépticos, cicatrizantes y anticancerígenos (Aziz *et al.*, 2018). En la producción animal, se ha observado que los AE adicionados en la dieta alimenticia participan en la modificación

del microbioma intestinal y en la inmunidad de los animales (Kraimi *et al.*, 2019; Qamar *et al.*, 2020; Chávez-Soto *et al.*, 2021); son capaces de mejorar la morfología intestinal, los procesos de digestión y absorción de nutrientes; además, disminuye el gasto energético y la inflamación intestinal (Maya-Ortega *et al.*, 2021); asimismo, previenen infecciones intestinales que provocan diarreas, que son una de las mayores causas de muerte en cerdos recién destetados. Baca & Ampuero (2019), Buenaño-Haro & Bravo-Sánchez (2022), observaron que los AE influyen en los animales, según el nivel de suplementación que se realice, mejoran el consumo, la ganancia de peso, la conversión alimentaria y la digestibilidad del alimento, al optimizar la capacidad de absorción de las vellosidades en lechones recién destetados. Se ha sugerido que estos aditivos mejoran el sabor del alimento, la secreción de enzimas digestivas, la motilidad gástrica e intestinal, la estimulación endocrina e inmune, la actividad antiinflamatoria, antioxidante y, por consecuencia, se obtienen mejoras en el consumo, la digestibilidad, la conversión alimentaria y el peso de los animales (Gheisar & Kim, 2017, Madrid *et al.*, 2018). Se ha observado que mejoran el equilibrio redox en diferentes órganos al atenuar el daño oxidativo inducido por diferentes factores estresantes fisiológicos (Zeng *et al.*, 2014; Martínez *et al.*, 2015). Zeng *et al.* (2015), observaron que los cerdos alimentados con una dieta suplementada con AE tenían niveles más altos de albúmina, IgA, IgG, capacidad antioxidante total y puntuación fecal más baja en comparación con los cerdos alimentados con dietas testigo. En un estudio *in vivo* en cerdos, se observó que la suplementación dietética con 100 mg/kg de una mezcla de carvacrol y timol (1:1) disminuyó el estrés oxidativo intestinal asociado al destete mediante la disminución del ARNm del factor de necrosis tumoral- α (TNF- α ; Wei *et al.*, 2017).

4.1. EFECTO DE LOS ACEITES ESENCIALES EN LA CERDA Y LOS LECHONES

Miller *et al.* (2009), observaron que la suplementación con 2 g/kg de una mezcla de AE, desde 10 días antes de la fecha estimada del parto hasta el destete, mejoró el consumo de alimento y disminuyó la pérdida de peso de las cerdas durante la primera semana de lactancia y aumentó el peso corporal de los lechones al destete. Hall *et al.* (2021), observaron que las cerdas en lactancia suplementadas con AE de orégano lograron lechones más pesados a la semana de edad, 10 semanas después del destete y en el momento del sacrificio. También, los registros sanitarios mostraron que los lechones procedentes de las camadas suplementadas con AE redujeron significativamente la incidencia de tratamiento terapéutico y la mortalidad.

Se ha observado que la suplementación con AE mejora el estado inmunológico de los lechones después del destete, al aumentar la tasa de proliferación de linfocitos, la

tasa de fagocitosis, así como los niveles séricos de IgG, IgA, IgM, C3 y C4 (Li *et al.*, 2012; Zeng *et al.*, 2014). Hernández-García *et al.* (2024), realizaron un metaanálisis sobre el uso de AE como aditivo dietético para lechones destetados en el rendimiento del crecimiento, estado antioxidante, respuesta inmune y morfología intestinal, y determinaron que la suplementación con AE aumentó ($p<0.001$) el consumo diario promedio de alimento, la ganancia diaria promedio y el peso corporal final, y disminuyó ($p<0.001$) el índice de conversión alimenticia y la incidencia de diarrea. Se observó un menor contenido sérico de malondialdehído ($p=0.001$) y mayores concentraciones séricas ($p<0.05$) de superóxido dismutasa, catalasa, glutatión peroxidasa y capacidad antioxidante total en respuesta a la inclusión dietética de AE. La suplementación con AE aumentó ($p<0.001$) la concentración sérica de inmunoglobulinas A, G y M y disminuyó ($p<0.05$) la concentración sérica del TNF- α , interleucina-1 β e interleucina-6. Se observó una mayor ($p<0.001$) altura de las vellosidades (AV) en el yeyuno y el íleon en respuesta a la inclusión dietética de AE. Sin embargo, la suplementación con AE no afectó ($p>0.05$) la profundidad de las criptas (PC) y disminuyó ($p<0.001$) la relación AV/PC en el duodeno, yeyuno e íleon; estos autores, concluyeron que los aceites esenciales se pueden utilizar como aditivo dietético para mejorar el rendimiento del crecimiento y reducir la incidencia de diarrea en lechones destetados y, al mismo tiempo, mejorar el estado antioxidante en el suero sanguíneo, la respuesta inmune y la morfología intestinal.

5. ACEITE ESENCIAL DE CANELA (CINAMALDEHÍDO)

La canela es una especia que se obtiene de la corteza interna de varios árboles del género *Cinnamomum* y es una de las principales fuentes de cinamaldehído (Shreaz *et al.*, 2016). Las especies más comunes de canela son *C. cassia* (canela china) y *C. verum* (*C. zeylanicum*, o canela verdadera). El AE de estas dos especies contienen un porcentaje variable de cinamaldehído con hasta un 85.3 y 90.5%, respectivamente (Shreaz *et al.*, 2016). Cerca de 89 compuestos se han aislado de diferentes partes de la planta de canela; de éstos, el cinamaldehído es el componente principal (Friedman, 2017). Diferentes estudios han demostrado que el cinamaldehído aislado del AE de canela inhibe eficazmente el crecimiento de una variedad de microorganismos como bacterias, mohos y levaduras; también se ha informado que inhibe la producción de toxinas por parte de los microorganismos (Friedman, 2017). Se ha observado que la complementación de la dieta de los pollos de engorde con aceite de canela (cinamaldehído) dio como resultado una caída significativa en los niveles de proteína de choque térmico, lo que puede reducir el estrés por calor (Abd El-Hack *et al.*, 2020). Manzanilla *et al.* (2009), observaron

que la incorporación de carvacrol, cinamaldehído y oleoresina de pimienta promueve resultados positivos y negativos en la función digestiva, epitelio intestinal, ecología microbiana y fermentación en cerdos destetados, lo que se ha asociado con la cantidad de proteína incluida en la dieta; por su parte, Liu *et al.* (2025), observaron que la adición de ácido fumárico y cinamaldehído, solos o en combinación en la dieta, puede mejorar el rendimiento del crecimiento, la función antioxidante y la capacidad antiinflamatoria de los lechones destetados, y la adición combinada tiene un efecto sinérgico.

5.1. EFECTO DEL CINAMALDEHÍDO EN LOS MICROORGANISMOS

El aceite de canela (*Cinnamomum zeylanicum*) está compuesto por cinamaldehído (71.5%), linalol (7%), β -cariofileno (6.4%), eucaliptol (5.4%) y eugenol (4.6%); los compuestos fenólicos y bioactivos tienen capacidad para eliminar radicales libres e inhibir la oxidación del β -caroteno; así como, bacterias patógenas y de descomposición, especialmente las Gram+ (Behbahani *et al.*, 2020). En estudios *in vitro* se ha observado que el cinamaldehído actúa contra bacterias resistentes a los antimicrobianos (Sakia *et al.*, 2020).

El eugenol y el cinamaldehído tienen un grupo funcional fenólico y se ha informado de sus actividades antimicrobianas relacionadas con los efectos en la membrana y en la generación de energía (Gill & Holley, 2004; 2006); estos AE pueden inhibir eficazmente la actividad de la histidina descarboxilasa de *Enterococcus aerogenes* en niveles subletales (Wendakoon & Sakaguchi, 1995). Se cree que el grupo hidroxilo del eugenol y el grupo carbonilo del cinamaldehído se unen a las proteínas e inhiben la acción de las descarboxilasas de aminoácidos en *E. aerogenes*. Por tanto, el principal mecanismo de acción del timol, carvacrol, eugenol y cinamaldehído está relacionado con sus efectos sobre las membranas citoplasmáticas y el metabolismo energético. También, se ha informado que el cinamaldehído y el eugenol, tienen actividad antibacteriana contra *Salmonella* spp., *Escherichia coli* y *Staphylococcus aureus* (Chang *et al.*, 2001); además, puede interrumpir el crecimiento de bacterias patógenas y promover el crecimiento de bacterias beneficiosas en el tracto digestivo de las aves (Kishawy *et al.*, 2019). El cinamaldehído a una dosis de 100 a 400 mg/kg en la dieta de lechones recién destetados tuvo una actividad antimicrobiana contra bacterias coliformes y *E. coli* (Van Liefferinge *et al.*, 2022). Li *et al.* (2012), compararon el rendimiento de lechones alimentados con una dieta testigo no suplementada con el de lechones alimentados con una dieta suplementada con antibióticos o una combinación de timol y cinamaldehído; los resultados obtenidos indicaron que el aumento de peso, la conversión alimenticia y la consistencia fecal de los cerdos alimentados con estos AE fueron iguales a la de los

cerdos alimentados con antibióticos. Zeng *et al.* (2014), observaron que la adición de 0.25 g/kg de AE (4.5% cinamaldehído y 13.5% timol) en dietas para cerdos destetados mejoró la ganancia de peso y la digestibilidad aparente de la materia seca, la proteína cruda y la energía en comparación con los cerdos alimentados con la dieta testigo. Li *et al.* (2012), al evaluar el efecto de AE comerciales que contenían timol y cinamaldehído a niveles de adición de 50-150 g/t en la dieta ofrecida a cerdos en crecimiento, observaron mayores ganancias de peso en comparación con los animales testigo (0.430 vs. 0.370 kg/d, respectivamente), reducción de las diarreas (3.6 vs. 7.5%) y de la cuenta de *E. coli* en las heces (6.3 vs. 6.7%), aumento de la población de *Lactobacillus* (7.6 vs. 7.2%) y una mejor conversión alimenticia (1.90 vs.1.96), respecto del testigo. También, el consumo de alimento adicionado con aceite de canela a niveles de 1 g/kg, a partir de los 109 días de gestación y durante la lactancia hasta el destete (a los 25.2 ± 2.6 d después del parto de la cerda) tendió a aumentar la ingesta de alimento en las cerdas multiparas (6.20 ± 0.21 vs. 5.66 ± 0.20 kg; $p=0.06$), pero no en las cerdas primiparas (5.13 ± 0.33 vs. 5.56 ± 0.33 kg, $p = 0.35$); además, la tasa de mortalidad de los lechones antes del destete fue menor en las cerdas que consumieron alimento suplementado con aceite de canela en comparación con el grupo testigo (15.5 vs. 25.6%, $p=0.029$; Khamtawee *et al.*, 2021).

6. ÁCIDOS ORGÁNICOS

Los AO están ampliamente distribuidos en la naturaleza; forman parte de los constituyentes normales de plantas y tejidos animales; también, se producen por síntesis química o fermentación microbiana de carbohidratos en el intestino grueso (Hajati, 2018); se han utilizado durante mucho tiempo para apoyar el crecimiento de los cerdos, especialmente al destete, y más recientemente se han convertido en una alternativa a los promotores del crecimiento sintéticos para mejorar la eficiencia de la producción de los cerdos (Tugnoli *et al.*, 2020). Se ha informado que los AO son eficientes promotores del crecimiento a lo largo del ciclo de producción de los cerdos, aunque existe una variación relativamente grande en las respuestas debido a diversos factores, como el tipo y la dosis de AO utilizados, la duración de la suplementación, el tipo de dieta y la capacidad de amortiguación, las normas de higiene y bienestar, el estado de salud y la edad de los animales (Mroz *et al.*, 2006). Los AO se utilizan principalmente durante el período de destete, que es considerada una de las etapas más críticas en la cría de cerdos, también durante la gestación, la lactancia y la engorda. La suplementación con AO produce una mejora en el rendimiento del desarrollo y en la eficiencia alimenticia; estos efectos, son consecuencia de los diferentes modos de acción sobre la composición del microbioma,

la morfología de la mucosa intestinal, la actividad enzimática y el metabolismo energético animal (Ferronato & Prandini, 2020).

7. CLASIFICACIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE LOS ÁCIDOS ORGÁNICOS

Los AO pueden ser clasificados en tres categorías principales: ácidos grasos de cadena corta (AGCC), ácidos grasos de cadena media (AGCM) y ácidos tricarbóxicos (ATC) (Grilli & Piva, 2012). Los AGCC, o ácidos monocarbóxicos simples de cinco átomos de carbono máximo, como los ácidos acético, fórmico, propiónico y butírico, se sintetizan en el intestino grueso mediante la fermentación de azúcares y aminoácidos no digeribles por parte de los microorganismos benéficos (Tugnoli *et al.*, 2020; Rathnayake *et al.*, 2021). Particularmente, el ácido acético, propiónico y butírico se generan en una relación fisiológica (60:25:15), y desempeñan un papel clave para el trofismo de la mucosa intestinal y el metabolismo general (Mroz, 2005). En los lechones y cerdos mejoran la morfología intestinal y tienen un efecto favorable sobre la pared intestinal, al reducir la inflamación (Suiryanrayna & Ramana, 2015). También, gracias a su estado líquido, los AGCC se emplean principalmente como acidificantes de alimentos, inoculantes de ensilaje y conservantes (Tugnoli *et al.*, 2020).

Los AGCM, o ácidos carbóxicos que poseen un grupo hidroxilo y contienen de 6 a 12 átomos de carbono, como los ácidos málico, cítrico, tartárico y láctico, constituyen una importante fuente de energía con alta actividad antimicrobiana debido a su alto valor de constante de disociación (pKa) (Tugnoli *et al.*, 2020; Rathnayake *et al.*, 2021). Estos ácidos se incorporan a los fosfolípidos de la membrana celular; además, pueden representar una fuente importante de energía en la nutrición de lechones jóvenes (Diao *et al.*, 2019). Debido a su alta constante de disociación (pKa) los AGCM tienen una notable actividad antibacteriana en comparación con los AGCC en el intestino grueso (Gupta *et al.*, 2019).

Por último, los ATC cuentan con dobles enlaces como el ácido sórbico y el fumárico; son intermediarios en el ciclo de Krebs e intervienen en el metabolismo energético (Tugnoli *et al.*, 2020; Rathnayake *et al.*, 2021). Los ATC cambian la morfología intestinal y la función de barrera, con una influencia favorable en el microbioma (Li *et al.*, 2019).

La eficacia antimicrobiana de los ácidos orgánicos comunes está determinada por la pKa y la longitud de la cadena de carbono (C1-C7). La parte no disociada reduce el pH en el área citoplasmática, lo que altera los procesos metabólicos normales de ciertos tipos de bacterias, como *E. coli*, *Listeria spp.*, *Salmonella spp.*, *Clostridium spp.* y algunos coliformes (Suiryanrayna & Ramana, 2015), alteraciones que matan a la célula; las

células bacterianas se ven obligadas a gastar energía para expulsar los protones, lo que provoca la acumulación intracelular del anión ácido RCOO^- . La acumulación de aniones interfiere con la síntesis de ARN y ADN, lo que resulta en un deterioro del crecimiento y la multiplicación celular, así como en la presión osmótica celular, lo que induce efectos bactericidas y bacteriostáticos (Tugnoli *et al.*, 2020). Los AO de cadena larga (AOCL) tienen un mayor efecto inhibitorio en las bacterias Gram+ que en las Gram- debido a las diferencias estructurales en la membrana celular (Suiryanrayna & Ramana, 2015).

Además, los AO actúan como fuente de energía en el intestino, ya que son productos intermediarios del ciclo del ATC (Tariq *et al.*, 2019). Su inclusión en la dieta ayuda a prevenir la degradación tisular causada por la gluconeogénesis y la lipólisis (Suiryanrayna & Ramana, 2015). Los aniones de AO pueden formar complejos con minerales como el calcio, el fósforo, el magnesio y el zinc, lo que mejora la digestión de minerales y reduce la excreción de minerales suplementarios y nitrógeno (Liu *et al.*, 2018).

8. ACTIVIDAD ANTIMICROBIANA DE LOS ÁCIDOS ORGÁNICOS

El mecanismo de acción de los AO comunes aún no se comprende completamente. Sin embargo, su mecanismo de acción podría deberse en parte a factores como: 1) la inhibición del desarrollo de microbios patógenos en el tracto gastrointestinal al reducir el pH intestinal; 2) la reducción de las tasas de vaciamiento gástrico y el mantenimiento de la secreción de enzimas endógenas; 3) la quelación mineral y la estimulación del metabolismo intermediario; y 4) facilitar la digestión como consecuencia de un pH gástrico más bajo y una mayor secreción de pepsina (Rathnayake *et al.*, 2021).

La adición de AO en la dieta puede tener un efecto beneficioso en el rendimiento de los animales ya que interfieren en la replicación de bacterias patógenas (Khan & Iqbal, 2015). También, la naturaleza lipófila de los AO débiles en su estado no disociado, les permite ingresar fácilmente a través de las membranas plasmática bacterianas, reducir el pH del interior, lo que eventualmente conduce a la muerte de la bacteria (Wang *et al.*, 2013; Nhara *et al.*, 2014). Los AO tienen una mayor eficacia contra las bacterias Gram- (Zhou *et al.*, 2007; Mahmoud, 2014). Sin embargo, Suiryanrayna & Ramana (2015) indicaron que los AOCL poseen un efecto más potente en la inhibición de las bacterias Gram+; asimismo, informaron que las condiciones ácidas en el estómago benefician el incremento de *lactobacilos*, que inhiben la proliferación y colonización de *E. coli* al bloquear los sitios de adhesión, o bien, ya sea por la producción de ácido láctico y sus metabolitos, que disminuyen el pH gástrico, y por consecuencia, controlan

los microorganismos patógenos. En un estudio con cerdos alimentados con dietas que contenían una combinación de AOCC y AOCM se redujo el pH en el estómago, así como la concentración de bacterias patógenas en el tracto gastro intestinal (TGI; Zentek *et al.*, 2013). Un pH gástrico bajo altera la microflora intestinal lo que resulta en una reducción de las especies bacterianas susceptibles a entornos ácidos, como *E. coli* y *Salmonella* (Khan & Iqbal, 2015).

Hay varios factores que contribuyen a la inhibición de los microorganismos por los AO, incluida la reducción del pH, la proporción de formas no disociadas de AO, la longitud de la cadena, el nivel de ramificación y la fisiología/metabolismo celular (Booth, 1985). Hay dos tipos principales de ácidos orgánicos; en el primer grupo se encuentran el ácido láctico, fumárico y cítrico, que son capaces de reducir el pH del estómago y disminuir indirectamente las bacterias sensibles al pH ácido. El segundo grupo está compuesto por el ácido butírico, fórmico, acético, propiónico y sórbico; éstos, reducen el pH en el TGI y actúan directamente sobre la pared celular de las bacterias Gram- (Papatisiros *et al.*, 2013).

Los AO que no están disociados pueden atravesar la membrana semipermeable del microorganismo e ingresar al citoplasma; una vez en el interior del microorganismo, las moléculas de AO se disocian y liberan protones de hidrógeno (H) que disminuyen el pH del citoplasma e interfieren con las enzimas involucradas en el transporte de nutrientes y las que se encargan de la transducción de señales de glucólisis de los microorganismos, lo que resulta en una deficiencia energética, debido al esfuerzo para mantener el pH interno de la célula bacteriana (Mroz *et al.*, 2006). En ese sentido, se ha reportado que la gran mayoría de las especies bacterianas requieren condiciones óptimas de pH ambiental; condiciones ambientes con pH menor a 4.5 afecta negativamente su supervivencia (Stratford & Eklund, 2003). Debido a que los AO poseen propiedades bactericidas y bacteriostáticas, se han propuesto los siguientes modo de acción sobre las bacterias Gram-: 1) los AO, al ser lipofílicos en su estado no disociados, penetran en el citoplasma de las bacterias (*Salmonella*); 2) los AO liberan iones H, lo que reduce el pH celular, y el metabolismo microbiano con base en enzimas disminuye; 3) para intentar restaurar el pH citoplasmático normal, la célula se ve obligada a expulsar los iones H a través de la membrana celular mediante la bomba de H-ATPasa, y 4) en última instancia, la proliferación de bacterias se ve mermada gradualmente al estar expuestas a los AO durante un tiempo prolongado (Lückstädt & Mellor, 2011).

9. EFECTOS SINÉRGICOS DE LOS ACEITES ESENCIALES COMBINADOS CON LOS ÁCIDOS ORGÁNICOS

Frecuentemente los AO se combinan con otros productos de origen natural, como los AE, para aprovechar posibles sinergias en el combate de las bacterias patógenas. Los AE sirven como antioxidantes, estimulan el sistema inmunológico, suprimen los microorganismos perjudiciales, estimulan los microbios beneficiosos y regulan la actividad de las enzimas, especialmente la lipasa; protegen las vellosidades intestinales e interfieren con la replicación del ADN de las células bacterianas, lo que les confiere efectos antibacterianos (Suiryanrayna & Ramana, 2015).

Existen varios estudios que demuestran los efectos aditivos de algunos AE y AO (Zhou *et al.*, 2007; Gheisar *et al.*, 2015; Gao *et al.*, 2019). Zhou *et al.* (2007), informaron que un AE (carvacrol o timol) en combinación con ácido acético o ácido cítrico, pero no con ácido láctico, tenía una mejor eficacia contra las bacterias Gram- (*S. Typhimurium*), en comparación con el AE individual o los AO solos. En un estudio *in vitro* se observaron efectos similares del cinamaldehído y el ácido láurico contra *Brachyspira hyodysenteriae*, el patógeno causante de la disentería porcina (Maele *et al.*, 2016). También, se confirmó que la combinación de ácido benzoico y AE a nivel de 3 g/kg mejora la ganancia diaria de peso de los lechones y, en consecuencia, el peso final, lo que representa una alternativa económicamente viable para sustituir los antibióticos en el alimento (Rodrigues *et al.*, 2020). Stamilla *et al.* (2020), observaron que la adición de una mezcla de AO y AE en la dieta de pollos de engorda, mejoró el crecimiento al final de la etapa de crecimiento y afectó positivamente la morfología intestinal. Además, se observó un control microbiano selectivo frente a *Clostridium perfringens*, *Enterobacteriaceae*, *Enterococos* y bacterias mesófilas. También, en la cama, el tratamiento dietético con AO y AE condujeron a una disminución general de los recuentos de bacterias mesófilas y *Enterococos*. Hu *et al.* (2023), observaron una mejora en el rendimiento productivo de pollos de engorde infectados con *Salmonella enteritidis* al alimentarlos con aceites esenciales recubiertos y una mezcla de ácidos orgánicos (timol, carvacrol, cinamaldehído, ácido caprílico, ácido benzoico y ácido butírico). En otro estudio se observó que un compuesto de carvacrol micro encapsulado y cinamaldehído mejoraron las variables productivas de los pollos de engorde (Bosetti *et al.*, 2020). Asimismo, se observó una mejora en el rendimiento del crecimiento, la morfología y el microbioma intestinal de pollos de engorda suplementados con un complejo de monoglicérido de ácido láurico y cinamaldehído en la dieta (Zheng *et al.*, 2023).

Liu *et al.* (2022), observaron que con una mezcla de AO y AE se optimizó el rendimiento, el estado inmune y antioxidante, así como la salud intestinal de los lechones

destetados. Liu *et al.* (2018), observaron que los AE y los AO mejoran la capacidad de los cerdos para evitar la colonización de bacterias patógenas en el intestino, mejoran la utilización de minerales, actúan como fuente de energía, estimulan la secreción de enzimas endógenas y optimizan la inmunidad y la estabilidad antioxidante. Ma *et al.* (2022), observaron que la suplementación con AE y AO micro encapsulados a nivel de 1.5 kg/t alivió la diarrea y mejoró la digestibilidad aparente de los nutrientes en los lechones, a través de la mejora de la inmunidad y capacidad antioxidantes, el aumento de la actividad de las enzimas digestivas, la regulación positiva de la expresión de genes relacionados con la barrera intestinal y la modificación de la estructura de las poblaciones microbianas del ciego y el colon. Jiménez *et al.* (2020), observaron que la suplementación con AO y cinamaldehído en la dieta de lechones destetados, a una dosis de 2 kg/t, protegió los tejidos intestinales contra el daño enterotoxigénico de *Escherichia coli*.

Se sabe que los fenoles en los AE pueden cambiar la estructura y funciones de la membrana celular bacteriana, lo que provoca hinchazón y, por lo tanto, un aumento de la permeabilidad de la membrana. La membrana celular comprometida podría explicar el sinergismo observado, ya que los compuestos fenólicos podrían causar daños importantes a las membranas celulares, y esto, aumenta la susceptibilidad de las bacterias a los AO. Además, la hidrofobicidad de un AE aumenta a un pH bajo, lo que le permite pasar más fácilmente a través de los lípidos de la membrana celular bacteriana (Karatzas *et al.*, 2001). En estudios posteriores, los resultados han mostrado claramente la eficacia *in vivo* de tales estrategias dietéticas sinérgicas en cerdos y aves de corral (Diao *et al.*, 2015; Balasubramanian *et al.*, 2016; Walia *et al.*, 2016; Liu *et al.*, 2017). Sin embargo, Alvarado-Núñez *et al.* (2021) al ofrecer una dieta suplementada con AE y AO (2 kg de AE+AO; 3% de aceite de hinojo -*Foeniculum vulgare*- y extracto de *Yucca shidigera*, 3% ácido propiónico y/o propionato de amonio y 16 % ácido fórmico y/o formiato de amonio) a partir del día 77 de gestación, 28 días de lactancia y 28 días post servicio, no observaron mejoras en el desempeño productivo de las cerdas. En el Cuadro 1 se resumen resultados de estudios realizados sobre el efecto de la adición aceites esenciales y ácidos orgánicos en la salud intestinal y respuesta productiva en cerdos y aves de corral.

Cuadro 1. Resultados de efectos de la adición de aceites esenciales solos o en combinación con ácidos orgánicos en la salud intestinal y respuesta productiva en cerdos y aves de corral.

Nivel de inclusión de AE y AO	Resultados	Fuente
Cinamaldehído (0.16 mM) + Acido láurico (0.31 mM). In vitro	Efecto antibacteriano contra <i>Brachyspira hyodysenteriae</i>	Maele et al. (2016)

Blend micro encapsulado (60% cinamaldehído + 30% carvacrol). *Dosis 100 mg/kg **Dosis 200 y 400 mg/kg	* Mejora la GDP en pollos, fase inicial (1-7 d); mayor relación vellosidad/cripta, mejor integridad intestinal. ** Mitiga los efectos negativos de la infección por Salmonella enteritidis, mejora el rendimiento productivo y la salud intestinal modulando favorablemente la microbiota.	Bosetti et al. (2020)
AE+AO (8% timol, 8% carvacrol, 5% cinamaldehído, 1% ácido caprílico, 6% ácido benzoico y 1% ácido butírico). Dosis 500–800 mg/kg	Mejorar el crecimiento, la morfología intestinal, la capacidad antioxidante y la composición de la microbiota en pollo de engorda.	Hu et al. (2023)
Complejo (85% monoglicéridos de ácido láurico + 15% cinamaldehído). Dosis 500mg/kg	Mejorar el crecimiento, la morfología intestinal, la capacidad antioxidante y la composición de la microbiota en pollo de engorda.	Zheng et al. (2023)
AO + AE (2000 mg/kg de ácido benzoico + 100 mg/kg de timol)	Menor puntuación de diarrea, mejor relación de conversión alimenticia, mejor digestibilidad aparente total del extracto etéreo, Ca y ceniza bruta, mayores actividades de lipasa, lactasa y sacarosa en el yeyuno, recuentos más altos de Lactobacillus spp. en el contenido digestivo del íleon y de Bacillus spp. en el contenido digestivo del ciego, una menor concentración de nitrógeno amoniacal en el contenido digestivo del ciego en los días, mayor concentración de ácido butírico en el contenido del ciego y mayor relación altura de vellosidades: profundidad de criptas en el yeyuno e íleon.	Diao et al. (2015)
AE (500-1000 mg/kg)	Aumento el peso corporal el peso corporal de las cerdas, la ganancia diaria promedio, la puntuación fecal de los lechones lactantes y redujo el número de lechones con diarrea.	Balasubramanian et al. (2016)
AO + AE (0.2 % de mezcla de AO de cadena media + 0.6 % mezcla de AE)	Mejó el rendimiento del crecimiento, redujo la tasa de diarrea y mejoró la inmunidad sérica al regular la microbiota de los lechones destetados.	Han et al. (2018)
AE + AO micro encapsulado (2 g/kg)	Mejó la morfología intestinal y mostró efectos anti-diarreicos en lechones destetados expuestos a ETEC F4.	Choi et al. (2020)
Formula comercial estandarizada (AO + cinamaldehído). Dosis 2000 mg/kg	Protege los tejidos intestinales y hepáticos, reduce la inflamación y mejora la capacidad antioxidante en lechones desafiados con E. coli enterotoxigénica.	Jiménez et al. (2020)

AE de canela (1 g/kg)	Aumentó el consumo diario de alimento de las cerdas multíparas durante la lactancia en ambiente tropical y disminuyó la mortalidad de los lechones antes del destete.	Khamtawee et al. (2021)
Mezcla encapsulada de AO + AE (Timol 4.5%, Carvacrol 4.8%, Cinamaldehído 4.3%, Formiato de calcio 10.1%, Ácido cítrico 25.1%). Dosis 1000 - 2000 mg/kg	Mejoró el crecimiento, redujo la diarrea, fortaleció la inmunidad y la capacidad antioxidante, y reforzó la barrera intestinal de los lechones destetados.	Liu et al. (2022)
Mezcla encapsulada de AO + AE (timol, vainillina, eugenol, fumárico, sórbico, málico y cítrico). Dosis 1500 mg/kg	Reducción de diarreas en lechones, mejora en la capacidad antioxidante de cerdas, mayor digestibilidad de nutrientes y energía, regulación positiva de genes de la barrera intestinal, incremento de ácidos grasos volátiles beneficiosos en el ciego, modulación de la microbiota intestinal, aumento de bacterias beneficiosas.	Ma et al., 2022
Cinamaldehído al 45%. Dosis 1 g/kg	Mejoró el rendimiento reproductivo de la cerda, la calidad de la leche, el estado antioxidante y la microbiota, el peso al nacimiento y al destete de los lechones.	Jin et al. 2025

10. CONCLUSIONES

La adición de aceites esenciales y ácidos orgánicos en la dieta de los cerdos es una estrategia prometedora para mejorar la salud intestinal, el rendimiento productivo, la sostenibilidad de la producción porcina y para reducir el uso de antibióticos promotores del crecimiento. Sin embargo, su eficacia depende de factores como la dosificación precisa, un manejo adecuado del alimento y las combinaciones utilizadas. Las futuras investigaciones deberán enfocarse en optimizar el uso de los aceites esenciales y ácidos orgánicos, además de explorar nuevas combinaciones sinérgicas para maximizar sus beneficios.

LITERATURA CITADA

ABD EL-HACK ME, Alagawany M, Abdel-Moneim AE, Mohammed NG, Khafaga AF, Jumah MB, Othman S I, Allam A A, Elnesr SS. 2020. **Cinnamon (*Cinnamomum zeylanicum*) oil as potential alternative to antibiotics in poultry.** *Antibiotics*. 9:210. ISSN:2079-6382. <https://doi.org/10.3390/antibiotics9050210>

ALVARADO-NÚÑEZ JA, Hernández-Agüero M, Rodríguez-Campos L A. 2021. **Efecto de la suplementación con ácidos orgánicos y aceites esenciales en la productividad de cerdas.** *Nutrición Animal Tropical*. 15(2):147-161. ISSN:2215-3527. <https://doi.org/10.15517/nat.v15i2.48973>

- ÁLVAREZ-MARTÍNEZ F, Barrajón-Catalán E, Herranz-López M, Micol V. 2021. **Antibacterial compounds, extracts, and essential oils: An updated review on their effects and putative mechanisms of action.** *Phytomedicine*. 90:153626. ISSN:0944-7113. <https://doi.org/10.1016/j.phymed.2021.153626>
- ARRIGONI R, Ballini A, Jirillo E, Santacroce L. 2024. **Current view on major natural compounds endowed with antibacterial and antiviral effects.** *Antibiotics*. 13(7):603. ISSN:2079-6382. <https://doi.org/10.3390/antibiotics13070603>
- AZHDARZADEH F, Hojjati M. 2016. **Chemical composition and antimicrobial activity of leaf, ripe and unripe peel of bitter orange (*Citrus aurantium*) essential oils.** *Nutrition and Food Science Research*. 3:43–50. ISSN:2770-4475. <https://nfsr.sbmu.ac.ir/article-1-118-en.pdf>
- AZIZ ZA, Ahmad A, Setapar SH, Karakucuk A, Azim MM, Lokhat D, Rafatullah M, Ganash M, Kamal MA, Ashraf GM. 2018. **Essential oils: extraction techniques, pharmaceutical and therapeutic potential-A review.** *Current Drug Metabolism*. 19:1100–1110. ISSN:1875-5453. <https://doi.org/10.2174/1389200219666180723144850>
- BACA CN, Ampuero BA. 2020. **Efecto de la inclusión de aceite esencial de orégano en la dieta de lechones destetados sobre parámetros productivos.** *Revista de investigaciones veterinarias del Perú*. 30(4):1537–1542. ISSN:1609-9117. <https://doi.org/10.15381/rivep.v30i4.17145>
- BALASUBRAMANIAN B, Park JW, Kim IH. 2016. **Evaluation of the effectiveness of supplementing micro-encapsulated organic acids and essential oils in diets for sows and suckling piglets.** *Italian Journal of Animal Science*. 15(4):626–633. ISSN:1594-4077. <https://doi.org/10.1080/1828051X.2016.1222243>
- BEHBAHANI A, Falah F, Arab L, Vasiee M, Yazdi T. 2020. **Chemical composition and antioxidant, antimicrobial, and antiproliferative activities of *Cinnamomum zeylanicum* bark essential oil.** *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*. 29(2020):5190603. ISSN:1741-4288. <https://doi.org/10.1155/2020/5190603>
- BOOTH I R. 1985. **Regulation of cytoplasmic pH in bacteria.** *Microbiological Reviews*. 49(4):359. ISSN:1574-6976. <https://doi.org/10.1128/mr.49.4.359-378.1985>
- BOSETTI GE, Griebler L, Aniecevski E, Facchi CS, Baggio C, Rossatto G, Leite F, Valentini FDA, Santo AD, Pagnussatt H, Boiago MM, Petrolli TG. 2020. **Microencapsulated carvacrol and cinnamaldehyde replace growth-promoting antibiotics: effect on performance and meat quality in broiler chickens.** *Anais da Academia Brasileira de Ciências*. 92(3):e20200343. ISSN:1678-2690. <https://doi.org/10.1590/0001-3765202020200343>
- BUENAÑO-HARO CX, Bravo-Sánchez LR. 2022. **Uso del jengibre (*Zinger officinale*) y cúrcuma (*Curcuma longa*) como aditivos fitobióticos en lechones posdestete.** *Koinonia*. 7(14):32-43. ISSN:2623-3738. <http://dx.doi.org/10.35381/r.k.v7i14.1853>
- CABALLERO B, Trugo LC, Finglas PM. 2003. **Encyclopedia of food sciences and nutrition.** Amsterdam, Academic Press. ISBN: 978-0-12-227055-0. <https://www.intechopen.com/chapters/62573>
- CHANG ST, Chen PF, Chang SC. 2001. **Antibacterial activity of leaf essential oils and their constituents from *Cinnamomum osmophloeum*.** *Journal of Ethnopharmacology*. 77:123–127. ISSN:1872-7573. [https://doi.org/10.1016/S0378-8741\(01\)00273-2](https://doi.org/10.1016/S0378-8741(01)00273-2)
- CHÁVEZ-SOTO D, Vázquez-Armijo J, Hernández-Meléndez J, Martínez-González J, Esparza-Jiménez S, López-Aguirre D. 2021. **Essential oils in small ruminants and their effect on productivity.** *Tropical and Subtropical Agroecosystems*. 24(2):1-12. ISSN:1870-0462. <http://dx.doi.org/10.56369/tsaes.3468>

- CHOI J, Wang L, Liu S, Lu P, Zhao X, Liu H, Lahaye L, Santin E, Liu S, Nyachoti M, Yanng C. 2020. **Effects of a microencapsulated formula of lactic acids and essential oils on nutrient absorption, immunity, gut barrier function, and abundance of enterotoxigenic *Escherichia coli* F4 in weaned piglets challenged with *E. coli* F4.** *Journal of Animal Science*. 98(9): skaa259. ISSN:1525-3163. <https://doi.org/10.1093/jas/skaa259>
- COSTA M, Alfieri A, Bessegato J, Filho J, Oba A, Weese S. 2017. **Different antibiotic growth promoters induce specific changes in the cecal microbiota membership of broiler chicken.** *PLoS ONE*. 12(2):1-14. ISSN:1932-6203. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0171642>
- DIAO H, Jiao AR, Yu B, Mao XB, Chen DW. 2019. **Gastric infusion of short-chain fatty acids can improve intestinal barrier function in weaned piglets.** *Genes & Nutrition*. 14(4):1-16. ISSN:1865-3499. <https://doi.org/10.1186/s12263-019-0626-x>
- DIAO H, Zheng P, Yu B, He J, Mao X, Yu J, Chen D. 2015. **Effects of benzoic acid and thymol on growth performance and gut characteristics of weaned piglets.** *Asian-Australasian Journal Animal Science*. 28(6):827-839. ISSN:1976-5517. [http://refhub.elsevier.com/S2405-6545\(17\)30123-3/sref43](http://refhub.elsevier.com/S2405-6545(17)30123-3/sref43)
- FERRONATO G, Prandini A. 2020. **Dietary supplementation of inorganic, organic, and fatty acids in pig: a review.** *Animals*; 10(10):1740. ISSN:2076-2615. <https://doi.org/10.3390/ani10101740>
- FRIEDMAN M. 2017. **Chemistry, antimicrobial mechanisms, and antibiotic activities of cinnamaldehyde against pathogenic bacteria in animal feeds and human foods.** *Journal Of Agricultural and Food Chemistry*. 65(48):10406-10423. ISSN:1520-5118. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.7b04344>
- GHEISAR MM, Kim IH. 2017. **Phytobiotics in poultry and swine nutrition – a review.** *Italian Journal of Animal Science*. 17(1):1-8. ISSN:1828-051X. <https://doi.org/10.1080/1828051X.2017.1350120>
- GHEISAR MM, Hosseindoust A, Kim IH. 2015. **Evaluating the effect of microencapsulated blends of organic acids and essential oils in broiler chickens diet.** *Journal of Applied Poultry Research*. 24:511-519. ISSN:1537-0437. <https://doi.org/10.3382/japr/pfv063>
- GILL A O, Holley R. 2004. **Mechanisms of bactericidal action of Cinnamaldehyde against *Listeria monocytogenes* and of eugenol against *L. monocytogenes* and *Lactobacillus sakei*.** *Applied And Environmental Microbiology*. 70(10):5750-5755. ISSN:1098-5336. <https://doi.org/10.1128/aem.70.10.5750-5755.2004>
- GILL A, Holley R. 2006. **Disruption of *Escherichia coli*, *Listeria monocytogenes* and *Lactobacillus sakei* cellular membranes by plant oil aromatics.** *International Journal of Food Microbiology*. 108(1):1-9. ISSN:1879-3460. [http://refhub.elsevier.com/S2405-6545\(17\)30123-3/sref56](http://refhub.elsevier.com/S2405-6545(17)30123-3/sref56)
- GRILLI E, Piva A. 2012. **Organic acids and their role in reducing foodborne pathogens in food animals.** *Current Research Information System*. 2(2):183-210. ISSN:2577-9958. <https://hdl.handle.net/11585/154684>
- GUPTA RC, Srivastava A, Lall R. 2019. **Nutraceuticals in veterinary medicine.** Cham, Switzerland: Springer. ISBN: 978-3-030-04623-1. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-04624-8>
- HAJATI H. 2018. **Application of organic acids in poultry nutrition.** *International Journal of Avian & Wildlife Biology*. 3(4):324-329. ISSN:2574-9862. <https://doi.org/10.15406/ijawb.2018.03.00114>
- HALL H N, Wilkinson D J, Le Bon M. 2021. **Oregano essential oil improves piglet health and performance through maternal feeding and is associated with changes in the gut microbiota.** *Animal Microbiome*. 3(2):2-17. ISSN:2524-4671. <https://doi.org/10.1186/s42523-020-00064-2>

HAN YS, Tang CH, Zhao QY, Zhan TF, Zhang K, Han YM, Zhang JM. 2018. **Effects of dietary supplementation with combinations of organic and medium chain fatty acids as replacements for chlortetracycline on growth performance, serum immunity, and faecal microbiota of weaned piglets.** *Livestock Science*. 216:210–218. ISSN:1878-0490. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2018.08.013>

HELANDER I M, Alakomi H, Latva-Kala K, Mattila-Sandholm T, Pol I, Smid E J, Gorris L G, Von Wright A. 1998. **Characterization of the action of selected essential oil components on Gram-Negative bacteria.** *Journal Of Agricultural and Food Chemistry*. 46(9):3590-3595. ISSN:1520-5118. <https://doi.org/10.1021/jf980154m>

HERNÁNDEZ-GARCÍA PA, Orzuna-Orzuna JF, Godina-Rodríguez JE, Chay-Canul AJ, Silva GV. 2024. **A meta-analysis of essential oils as a dietary additive for weaned piglets: growth performance, antioxidant status, immune response, and intestinal morphology.** *Research In Veterinary Science*. 170:105181. ISSN:1532-2661. <https://doi.org/10.1016/j.rvsc.2024.105181>

HOFFMANN KH. 2020. **Essential Oils.** *Zeitschrift für Naturforschung C*. 75(7-8):177. ISSN:1865-7109. <https://doi.org/10.1515/znc-2020-0124>

HU Z, Liu L, Guo F, Huang J, Qiao J, Bi R, Huang J, Zhang K, Guo Y, Wang Z. 2023. **Dietary supplemental coated essential oils and organic acids mixture improves growth performance and gut health along with reduces Salmonella load of broiler chickens infected with Salmonella enteritidis.** *Journal of Animal Science and Biotechnology*. 14:95. ISSN:2049-1891. <https://doi.org/10.1186/s40104-023-00889-2>

HYLDGAARD M, Mygind T, Meyer RL. 2012. **Essential oils in food preservation: mode of action, synergies, and interactions with food matrix components.** *Frontiers In Microbiology*. 3(12):1-24. ISSN:2371-9818. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2012.00012>

JIMÉNEZ M J, Berrios R, Stelzhammer S, Bracarense A. 2020. **Ingestion of organic acids and cinnamaldehyde improves tissue homeostasis of piglets exposed to enterotoxigenic Escherichia coli (ETEC).** *Journal of animal science*. 98(2):1-11. ISSN:1525-3163. <https://doi.org/10.1093/jas/skaa012>

KARATZAS A, Kets E, Smid E, Bennis M. 2001. **The combined action of carvacrol and high hydrostatic pressure on Listeria monocytogenes Scott A.** *Journal of Applied Microbiology*. 90(3):463-469. ISSN:1365-2672. [10.1046/j.1365-2672.2001.01266.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-2672.2001.01266.x)

KHAMTAWEE I, Singdamrong K, Tatanan P, Chongpaisarn P, Dumniem N, Pearodwong P, Suwimonteerabutr J, Nuntapaitoon M, Tummaruk P. 2021. **Cinnamon oil supplementation of the lactation diet improves feed intake of multiparous sows and reduces pre-weaning piglet mortality in a tropical environment.** *Livestock Science*. 251:104657. ISSN:871-1413. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2021.104657>

KHAN SH, Iqbal J. 2015. **Recent advances in the role of organic acids in poultry nutrition.** *Journal of Applied Animal Research*. 44(1):359–369. ISSN:0974-1844. <https://doi.org/10.1080/09712119.2015.1079527>

KISHAWY ATY, Amer SA, Abd El-Hack ME, Saadeldin IM, Swelum A A. 2019. **The impact of dietary linseed oil and pomegranate peel extract on broiler growth, carcass traits, serum lipid profile, and meat fatty acid, phenol, and flavonoid contents.** *Asian-Australasian Journal Animal Science*. 32(8):1161-1171. ISSN:1976-5517. <https://doi.org/10.5713/ajas.18.0522>

KOGUT MH, Yin Xiao Nan YX, Yuan Jian Min YJ, Broom L. 2017. **Gut health in poultry.** *CAB Reviews Perspectives in Agriculture Veterinary Science Nutrition and Natural Resources*. 17(31):1–7. ISSN:1749-8848. <https://doi.org/10.1079/pavsnr201712031>

KRAIMI N, Dawkins M, Gebhardt-Henrich SG, Velge P, Rychlik I, Volf J, Creach P, Smith A, Colles F, Leterrier C. 2019. **Influence of the microbiota-gut-brain axis on behavior and welfare in farm animals: a review.** *Physiology & Behavior.* 210:112658. ISSN:1873-507X. <https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2019.112658>

KUPPUSAMY S, Kakarlab D, Venkateswarluc K, Megharajd M, Yoone YE, Lee YB. 2018. **Agriculture, ecosystems and environment veterinary antibiotics (VAs) contamination as a global agro-ecological issue: a critical view.** *Agriculture, Ecosystems & Environment.* 257:47–59. ISSN:1873-2305. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.01.026>

LAN RX, Li TS, Kim IH. 2016. **Effects of essential oils supplementation in different nutrient densities on growth performance, nutrient digestibility, blood characteristics and fecal microbial shedding in weaning pigs.** *Animal Feed Science and Technology.* 214:77–85. ISSN:0377-8401. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2016.02.011>

LI PF, Piao XS, Ru YJ, Han X, Xue LF, Zhang HY. 2012. **Effects of adding essential oil to the diet of weaned pigs on performance, nutrient utilization, immune response and intestinal health.** *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences.* 25(11):1617–26. ISSN:1976-5517. <https://doi.org/10.5713/ajas.2012.12292>

LI X, Mao M, Zhang Y, Yu K, Zhu W. 2019. **Succinate modulates intestinal barrier function and inflammation response in pigs.** *Biomolecules.* 9(9):486. ISSN:2218-273X. <https://doi.org/10.3390/biom9090486>

LIU A, Li Z, Jin X, Wu Q, Hu H, Zhang C. 2022. **An encapsulated organic acid and essential oil mixture improves the intestinal health of weaned piglets by altering intestinal inflammation and antioxidative capacity.** *Animals.* 12(18):2426. ISSN:2076-2615. <https://doi.org/10.3390/ani12182426>

LIU Y, Abelilla J, Casas G, Espinosa C, Jaworski N, Kwon W, Lagos V, Lee S, Mathai J, Navarro D, Stein H. 2018. **Non-antibiotic feed additives in diets for pigs: a review.** *Animal nutrition.* 4(2):113-125. ISSN:2833-0161. <https://doi.org/10.1016/j.aninu.2018.01.007>

LIU Y, Yang X, Xin H, Chen S, Yang C, Duan Y, Yang X. 2017. **Effects of a protected inclusion of organic acids and essential oils as antibiotic growth promoter alternative on growth performance, intestinal morphology and gut microflora in broilers.** *Animal Science Journal.* 88(9):1414–1424. ISSN:1740-0929. <https://doi.org/10.1111/asj.12782>

LIU Yu-tong, Yang Guan-hua, Wang Lu-yao, Ma Xin-yi, Qiao Jia-yun, Li Hai-hua. 2025. **Effects of fumaric acid and cinnamic aldehyde and their combination on growth performance, serum biochemical and antioxidant indices and intestinal inflammatory response of weaned piglets.** *Chinese Journal of Animal Nutrition.* 37(3): 1575-1584. ISSN:1006-267X. <https://doi.org/10.12418/CJAN2025.135>

SF, Xu YT, Pan L, Wang QQ, Wang CL, Wu JY, Wu YY, Han YM. 2018. **Mixed organic acids as antibiotic substitutes improve performance, serum immunity, intestinal morphology and microbiota for weaned piglets.** *Journal of Animal and Feed Sciences.* 235:23–32. ISSN:2719-8448. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2017.08.018>

LÜCKSTÄDT C, Mellor S. 2011. **The use of organic acids in animal nutrition, with special focus on dietary potassium diformate under European and Austral-Asian conditions.** *Recent Advances in Animal Nutrition – Australia.* 18(11):123-130. ISSN:0819-4823. [Recent-Advances-in-Animal-Nutrition-Australia-Vol-18-2011.pdf](https://doi.org/10.1016/j.raan.2011.08.018)

MA J, Long S, Wang J, Gao J, Piao X. 2022. **Microencapsulated essential oils combined with organic acids improve immune antioxidant capacity and intestinal barrier function as well as modulates**

- the hindgut microbial community in piglets.** *Journal of animal science and biotechnology.* 13(1):16. ISSN:2049-1891. <https://doi.org/10.1186/s40104-021-00670-3>
- MADRID T, López A, Parra J. 2018. **Efecto del aceite esencial de orégano (*Lippia origanoides*) sobre metabolitos sanguíneos en pollos de engorde.** *Revista de Medicina Veterinaria.* 1(37):25-33. ISSN:1852-771X. <https://doi.org/10.19052/mv.vol1.iss37.3>
- MAELE LV, Heyndrickx M, Dominiek M, Nele D, Maxime M, Verlinden M, Haesebrouck F, Boyen F. 2016. **In vitro susceptibility of *Brachyspira hyodysenteriae* to organic acids and essential oil components.** *Journal of Veterinary Medical Science.* 78(2):325-328. ISSN:1347-7439. [http://refhub.elsevier.com/S2405-6545\(17\)30123-3/sref100](http://refhub.elsevier.com/S2405-6545(17)30123-3/sref100)
- MAHMOUD BS. 2014. **The efficacy of grape seed extract, citric acid and lactic acid on the inactivation of *Vibrio parahaemolyticus* in shucked oysters.** *Food Control.* 41:13-16. ISSN:1873-7129. [http://refhub.elsevier.com/S2405-6545\(17\)30123-3/sref102](http://refhub.elsevier.com/S2405-6545(17)30123-3/sref102)
- MANZANILLA EG, Pérez JF, Martín M, Blandón JC, Baucells F, Kamel C, Gasa J. 2009. **Dietary protein modifies effect of plant extracts in the intestinal ecosystem of the pig at weaning.** *Journal of Animal Science.* 87(6):2029–2037. ISSN:1525-3163. <https://doi.org/10.2527/jas.2008-1210>
- MARTÍNEZ R, Ortega M, Herrera H J, Kawas G J, Zarate R J, Robles S R. 2015. **Uso de aceites esenciales en animales de granja.** *Interciencia.* 40(11):744-750. ISSN:0378-1844. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=33942541003>
- MASYITA A, Sari RM, Astuti AD, Yasir B, Rumata NR, Emran TB, Nainu F, Simal-Gandara J. 2022. **Terpenes and terpenoids as main bioactive compounds of essential oils, their roles in human health and potential application as natural food preservatives.** *Food Chemistry: X.* 13(22):100217. ISSN:2471-4291. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2022.100217>
- MAYA-ORTEGA C, Ángel-Isaza J, Martínez-Morales B, Parra-Suescún J. 2021. **Aceite esencial de orégano (*Lippia origanoides*) mejora parámetros productivos y metabolitos sanguíneos en lechones.** *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial.* 19(2):82-93. ISSN:1909-9959. <https://doi.org/10.18684/bsaa.v19.n2.2021.1547>
- MEHDI Y, Chorfi Y, Gaucher M-L, Létourneau-Montminy M-P, Rouissi T, Suresh G. 2018. **Use of antibiotics in broiler production: Global impacts and alternatives.** *Animal Nutrition.* 4(2):170-178. ISSN:2405-6383. <https://doi.org/10.1016/j.aninu.2018.03.002>
- MILLER JA, Laurenz JC, Rounsavall JW, Burdick C, Neher FJ. 2009. **Enhancing feed intake by the sow during lactation using BIOMIN® PEP. In PhytoGenics in animal nutrition: natural concepts to optimize gut health and performance,** edited by Steiner T. Nottingham University Press. Pp. 87–96. ISBN:1904761712. https://books.google.com.mx/books/about/PhytoGenics_in_Animal_Nutrition.html?id=Q3VFAQAIAAJ&redir_esc=y
- MOLINA A. 2019. **Probióticos y su mecanismo de acción en alimentación animal.** *Agronomía Mesoamericana.* 30(2):601–611. ISSN:2215-3608. <https://doi.org/10.15517/am.v30i2.34432>
- MROZ Z, Koopmans SJ, Bannink A, Partanen K, Krasucki W, Øverland M, Radcliffe S. 2006. **Carboxylic acids as bioregulators and gut growth promoters in nonruminants.** *Biology of growing animals.* 4(6):81-133. ISSN:1877-1823. [https://doi.org/10.1016/S1877-1823\(09\)70091-8](https://doi.org/10.1016/S1877-1823(09)70091-8)
- MROZ Z. 2005. **Organic acids as potential alternatives to antibiotic growth promoters for pigs.** *Advances in pork production.* 16(1):169-182. ISSN:1489-1395. <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/pdf/10.5555/20103212695>

NAZZARO F, Fratianni F, De Martino L, Coppola R, De Feo V. 2013. **Effect of essential oils on pathogenic bacteria.** *Pharmaceuticals*. 6(12):1451-1474. ISSN:1424-8247. <https://doi.org/10.3390/ph6121451>

NEAGU R, Popovici V, Ionescu LE, Ordeanu V, Popescu DM, Ozon E A, Gird CE. 2023. **Antibacterial and antibiofilm effects of different samples of five commercially available essential oils.** *Antibiotics*. 12(7):1191. ISSN:2079-6382. <https://doi.org/10.3390/antibiotics12071191>

NHARA RB, Marume U, Nantapo CW. 2024. **Potential of organic acids, essential oils and their blends in pig diets as alternatives to antibiotic growth promoters.** *Animals*. 14(5):762. ISSN:2076-2615. <https://doi.org/10.3390/ani14050762>

PANDEY AK, Kumar P, Singh P, Tripathi NN, Bajpai VK. 2017. **Essential oils: sources of antimicrobials and food preservatives.** *Frontiers In Microbiology*. 7:2161. ISSN:2371-9818. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.02161>

PAPATISIROS VG, Katsoulos PD, Koutoulis KC, Karatzia M, Dedousi A, Christodoulopoulos G. 2013. **Alternativas a los antibióticos para animales de granja.** *CAB Reviews: Perspectives in Agriculture, Veterinary Science, Nutrition and Natural Resources*. 8(2):1-15. ISSN:1749-8848. <https://doi.org/10.1079/PAVSNNR20138032>

PATEIRO M, Francisco B, Domínguez J, Sant A. 2018. **Essential oils as natural additives to prevent oxidation reactions in meat and meat products: A review.** *Food Research International*. 113:156-166. ISSN:1873-7145. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.07.014>

PERVEEN S. 2021. **Terpenos y terpenoides: avances recientes.** *En IntechOpen eBooks*; ISBN:978-1-83881-917-0. <https://doi.org/10.5772/intechopen.98261>

PLUSKE JR, Turpin DL, Sahibzada S, Pineda L, Han Y, Collins A. 2021. **Impacts of feeding organic acid-based feed additives on diarrhea, performance, and fecal microbiome characteristics of pigs after weaning challenged with an enterotoxigenic strain of *Escherichia coli*.** *Translational animal science*. 5:txab212. ISSN:2573-2102. <https://doi.org/10.1093/tas/txab212>

QAMAR A, Waheed J, Hamza A, Mohyuddin SG, Lu Z, Namula Z, Chenand Z, Chen JJ. 2020. **The role of intestinal of microbiota in chicken health, intestinal physiology and immunity.** *Journal of Animal and Plant Sciences*. 31(2):342-351. ISSN:2071-7024. <https://doi.org/10.36899/JAPS.2021.2.0221>

RATHNAYAKE D, Mun HS, Dilawar MA, Baek KS, Yang CJ. 2021. **Time for a paradigm shift in animal nutrition metabolic pathway: dietary inclusion of organic acids on the production parameters, nutrient digestibility, and meat quality traits of swine and broilers.** *Life*. 11(6):476. ISSN:2753-4952. <https://doi.org/10.3390/life11060476>

RESENDE M, Chaves RF, Garcia RM, Barbosa JA, Marques AS, Rezende LR, Peconick AP, Garbossa CAP, Mesa D, Silva CC, Barbosa FV, Falleiros DFT, de Souza CV. 2020. **Benzoic acid and essential oils modify the cecum microbiota composition in weaned piglets and improve growth performance in finishing pigs.** *Livestock Science*. 242:104311. ISSN:1878-0490. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2020.104311>

RODRIGUES LM, Neto TO d AL, Garbossa CAP, Martins CC d S, Garcez D, Alves LKS, de Abreu MLT, Ferreira RA, Cantarelli V d S. 2020. **Benzoic acid combined with essential oils can Be an alternative to the use of antibiotic growth promoters for piglets challenged with *E. coli* F4.** *Animals*. 10(11):1978. ISSN:2076-2615. <https://doi.org/10.3390/ani10111978>

SAKIA M, Seyed-Mohammadia S, Montazeria E, Siahpooshd A, Moosaviana M, Latifif S. 2020. **In vitro antibacterial properties of *Cinnamomum zeylanicum* essential oil against clinical extensively**

drug-resistant bacteria. *European Journal of Integrative Medicine.* 37:101146. ISSN:1876-3839. <https://doi.org/10.1016/j.eujim.2020.101146>

SAKKAS H, Papadopoulou C. 2017. **Antimicrobial activity of basil, oregano, and thyme essential oils.** *Journal of Microbiology and Biotechnology.* 27(3):429–438. ISSN:2320–3528. <https://doi.org/10.4014/jmb.1608.08024>

SALIM H M D, Haque-Beg M D A, Huque Khan-Shahidul Kamaruddin, Kazi M. 2018. **Global restriction of using antibiotic growth promoters and alternative strategies in poultry production.** *Science progress.* 101(1):52-75. ISSN:2047-7163. <https://doi.org/10.3184/003685018X15173975498947>

SATTERLEE T, McDonough CM, Gold SE, Chen C, Glenn AE, Pokoo-Aikins A. 2023. **Synergistic effects of essential oils and organic acids against *Aspergillus flavus* contamination in poultry feed.** *Toxins.* 15:635. ISSN:2072-6651. <https://doi.org/10.3390/toxins15110635>

SHREAZ S, Wani WA, Behbehani JM, Raja V, Irshad M, Karched M, Ali I, Siddiqi WA, Hun LT. 2016. **Cinnamaldehyde and its derivatives, a novel class of antifungal agents.** *Fitoterapia.* 112(4):116-131. ISSN:0367-326X. <https://doi.org/10.1016/j.fitote.2016.05.016>

STAMILLA A, Messina A, Sallemi S, Condorelli L, Antoci F, Puleio R, Loria GR, Cascone G, Lanza M. 2020. **Effects of microencapsulated blends of organics acids (OA) and essential oils (EO) as a feed additive for broiler chicken. A focus on growth performance, gut morphology and microbiology.** *Animals.* 10(3):442. ISSN:2076-2615. <https://doi.org/10.3390/ani10030442>

STEVANOVIC ZD, Sieniawska E, Glowniak K, Obradovic N, y Pajic-Lijakovic I. 2020. **Natural macromolecules as carriers for essential oils: from extraction to biomedical application.** *Frontiers In Bioengineering and Biotechnology.* 8:563. ISSN:2296-4185. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.00563>

STRATFORD M, Eklund T. 2003. **Organic acids and esters.** In: Russell NJ, Gould GW. (eds) Food preservatives. *Springer, Boston, MA.*, Pp. 48-84. ISBN:978-0-387-30042-9. https://doi.org/10.1007/978-0-387-30042-9_4

SUGIHARTO S. 2016. **Role of nutraceuticals in gut health and growth performance of poultry.** *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences.* 15(2):99-111. ISSN:1658-077X. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2014.06.001>

SUIRYANRAYNA MV, Ramana JV. 2015. **A review of the effects of dietary organic acids fed to swine.** *Journal of animal science and biotechnology.* 6(45):1-11. ISSN:2049-1891. <https://doi.org/10.1186/s40104-015-0042-z>

TARIQ S, Wani S, Rasool W, Bhat MA, Prabhakar A, Shalla AH, Rather MA. 2019. **A comprehensive review of the antibacterial, antifungal and antiviral potential of essential oils and their chemical constituents against drug-resistant microbial pathogens.** *Microbial Pathogenesis.* 134:103580. ISSN:1096-1208. <https://doi.org/10.1016/j.micpath.2019.103580>

TOSO F, Mestorino N, Ardoino S. 2023. **Aceites esenciales como alternativa a los antibióticos promotores de crecimiento en pollos de engorde.** *Investigación Joven.* 10:444–445. ISSN:2314-3991. <https://revistas.unlp.edu.ar/lnvJov/article/view/15477/14673>

TUGNOLI N, Giovagnoni N, Piva N, Grilli N. 2020. **From acidifiers to intestinal health enhancers: how organic acids can improve growth efficiency of pigs.** *Animals.* 10(1):134. ISSN:2076-2615. <https://doi.org/10.3390/ani10010134>

VAN LIEFFERINGE E, Forte C, Degroote J, Ovary A, Van Noten N, Mangelinckx S, Michiels J. 2022. **In vitro and in vivo antimicrobial activity of cinnamaldehyde and derivatives towards the intestinal bacteria of the weaned piglet.** *Italian Journal of Animal Science*. 21(1):493–506. ISSN:1828-051X. <https://doi.org/10.1080/1828051X.2022.2041113>

WALIA K, Argüello H, Lynch H, Leonard F C, Grant J, Yearsley D, Kelly S, Duffy G, Gardiner G E, Lawlor P G. 2016. **Effect of strategic administration of an encapsulated blend of formic acid, citric acid, and essential oils on Salmonella carriage, seroprevalence, and growth of finishing pigs.** *Preventive Veterinary Medicine*. 137(17): 28-35. ISSN:0167-5877. <https://doi.org/10.1016/j.pvetmed.2016.12.007>

WANG S, Wang W, Jin Z, Du B, Ding Y, Ni T, Jiao F. 2013. **Screening and diversity of plant growth promoting endophytic bacteria from peanut.** *African Journal of Microbiology Research*. 7(10):875-884. ISSN:1996-0808. [http://refhub.elsevier.com/S2405-6545\(17\)30123-3/sref160](http://refhub.elsevier.com/S2405-6545(17)30123-3/sref160)

WEI HK, Xue HX, Zhou ZX, Peng J. 2017. **A carvacrol–thymol blend decreased intestinal oxidative stress and influenced selected microbes without changing the messenger RNA levels of tight junction proteins in jejunal mucosa of weaning piglets.** *Animal*. 11(2):193–201. ISSN:2165-8110. <https://doi.org/10.1017/S1751731116001397>

WENDAKOON C N, Sakaguchi M. 1995. **Inhibition of amino acid decarboxylase activity of Enterobacter aerogenes by active components in spices.** *Journal of Food Protection*. 58(3):280-283. ISSN:1944-9097. [http://refhub.elsevier.com/S2405-6545\(17\)30123-3/sref164](http://refhub.elsevier.com/S2405-6545(17)30123-3/sref164)

WOAH (World Organization for Animal Health). 2023. **Uso de antimicrobianos como promotores de crecimiento.** <https://www.woah.org/app/uploads/2024/01/es-omsa-declaraciondeposicion-agp.pdf>

YANG H, Paruch L, Chen X, van Eerde A, Skomedal H, Wang Y, Liu D, Clarke J L. 2019. **Antibiotic application and resistance in swine production in China: current situation and future perspectives.** *Frontiers in veterinary science*. 6(136):1-8. ISSN:2297-1769. <https://doi.org/10.3389/fvets.2019.00136>

ZENG ZK, Xu X, Zhang Q, Li P, Zhao PF, Li Q, Liu J, Piao X. 2014. **Effects of essential oil supplementation of a Low-Energy diet on performance, intestinal morphology and microflora, immune properties, and antioxidant activities in weaned pigs.** *Animal Science Journal*. 83(3):279-285. ISSN:1740-0929. <https://doi.org/10.1111/asj.12277>

ZENG Z, Zhang S, Wang H, Piao X. 2015. **Essential oil and aromatic plants as feed additives in non-ruminant nutrition: a review.** *Journal of Animal Science and Biotechnology*. 6(1):7. ISSN:2049-1891. <https://doi.org/10.1186/s40104-015-0004-5>

ZENTEK J, Ferrara F, Pieper R, Tedin L, Meyer W, Vahjen W. 2013. **Effects of dietary combinations of organic acids and medium chain fatty acids on the gastrointestinal microbial ecology and bacterial metabolites in the digestive tract of weaning piglets.** *Journal of Animal Science*. 91(7):3200–3210. ISSN:1525-3163. <https://doi.org/10.2527/jas.2012-5673>

ZHAI H, Liu H, Wang S, Wu J, Kluefer AM. 2018. **Potential of essential oils for poultry and pigs.** *Animal Nutrition*. 4(2):179–186. ISSN:2405-6383. <https://doi.org/10.1016/j.aninu.2018.01.005>

ZHENG C, Chen Z, Yan X, Xiao G, Qiu T, Ou J, Cen M, Li W, Huang Y, Cao Y, Zhang H. 2023. **Effects of a combination of lauric acid monoglyceride and cinnamaldehyde on growth performance, gut morphology, and gut microbiota of yellow-feathered broilers.** *Poultry Science*. 102(8):102825. ISSN:1525-3171. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2023.102825>

ZHOU F, Ji B, Zhang H, Jiang H, Yang Z, Li J, Li J, Ren Y, Yan W. 2007. **Synergistic effect of thymol and carvacrol combined with chelators and organic acids against Salmonella Typhimurium.** *Journal of Food Protection*. 70(7):1704–1709. ISSN:1944-9097. <https://doi.org/10.4315/0362-028x-70.7.1704>

CAPÍTULO 12

COMPARACIÓN DE LA DENSIDAD Y POTENCIAL REPRODUCTIVO DE *Daphnia pulicaria* EN DIFERENTES FUENTES DE CARBONO CON LA INCORPORACIÓN DE LA BACTERIA *Burkholderia cepacia* COMO PROBIÓTICO

Data de submissão: 01/06/2026

Data de aceite: 16/06/2026

Jorge Castro Mejía

División de Ciencias Biológicas y de la Salud¹
Universidad Autónoma Metropolitana
Unidad Xochimilco
Ciudad de México, CDMX, México
<https://orcid.org/0000-0002-5632-2581>

Germán Castro Mejía

División de Ciencias Biológicas y de la Salud¹
Universidad Autónoma Metropolitana
Unidad Xochimilco
Ciudad de México, CDMX, México
<https://orcid.org/0000-0003-3007-1005>

María del Carmen Monroy Dosta

División de Ciencias Biológicas y de la Salud¹
Universidad Autónoma Metropolitana
Unidad Xochimilco
Ciudad de México, CDMX, México
<https://orcid.org/0000-0002-1856-0511>

José Antonio Mata Sotres

División de Ciencias Biológicas y de la Salud¹
Universidad Autónoma Metropolitana
Unidad Xochimilco
Ciudad de México, CDMX, México
<https://orcid.org/0000-0001-5817-3025>

Andrés Elías Castro Castellón

División de Ciencias Biológicas y de la Salud¹
Universidad Autónoma Metropolitana
Unidad Xochimilco
Ciudad de México, CDMX, México
<https://orcid.org/0000-0001-7696-2597>

Arnulfo Misael Martínez Meingüer

División de Ciencias Biológicas y de la Salud¹
Universidad Autónoma Metropolitana
Unidad Xochimilco
Ciudad de México, CDMX, México
<https://orcid.org/0000-0002-6255-4901>

José Alberto Ramírez Torrez

División de Ciencias Biológicas y de la Salud¹
Universidad Autónoma Metropolitana
Unidad Xochimilco
Ciudad de México, CDMX, México
<https://orcid.org/0000-0002-3321-6604>

RESUMEN: El estudio evaluó el efecto de cinco fuentes de carbono (mezquite, macroalga, café, moringa y almendro) sobre la densidad poblacional y el potencial reproductivo de *Daphnia pulicaria*, incorporando la bacteria *Burkholderia cepacia* como probiótico con el fin de mejorar la calidad nutricional y la estabilidad del cultivo. Se utilizaron recipientes de 200 L con 120 L de agua, inoculados con 300 mL de *B. cepacia* y 0.5 g de la fuente de carbono correspondiente, suministrada cada tercer día durante 30 días. Además, se agregaron cada

¹ Depto. El Hombre y su Ambiente, Laboratorio de Producción de Alimento Vivo y Biofloc. Cal. del Hueso No.1100. Alcaldía Coyoacan. CP. 04960. Ciudad de México

tercer día 1 L de *Navicula* sp. y 1 L de *Nannochloropsis* sp. como complemento alimenticio. La densidad poblacional se registró cada tercer día. Los resultados mostraron diferencias significativas entre tratamientos ($P < 0.001$). La macroalga produjo la mayor densidad poblacional: 1,258,701 organismos en 120 L (equivalente a 10,489 org/L), mientras que la moringa presentó la menor densidad: 129,266 organismos (1,077 org/L). En cuanto al potencial reproductivo, la macroalga también destacó con una R_0 de 2,516 crías por hembra, un T_c de 26.78 días y una tasa de crecimiento r de 0.29. La moringa mostró los valores más bajos ($R_0 = 258$, $r = 0.24$), aunque su T_c fue más corto (22.86 días), indicando una regeneración poblacional más rápida, pero con menor productividad total. En conclusión, el estudio demuestra que la macroalga combinada con *Burkholderia cepacia* es la fuente de carbono más eficiente para el cultivo de *Daphnia pulex*, logrando altas densidades y un elevado potencial reproductivo, lo que la convierte en una opción viable para la producción de alimento vivo en acuicultura.

PALABRAS CLAVE: *Daphnia pulex*; *Burkholderia cepacia*; fuentes de carbono; macroalga; alimento vivo; acuicultura.

COMPARISON OF POPULATION DENSITY AND REPRODUCTIVE POTENTIAL OF *Daphnia pulex* USING DIFFERENT CARBON SOURCES WITH THE INCORPORATION OF *Burkholderia cepacia* AS A PROBIOTIC

ABSTRACT: The study evaluated the effect of five carbon sources (mesquite, macroalgae, coffee, moringa, and almond) on the population density and reproductive potential of *Daphnia pulex*, incorporating the bacterium *Burkholderia cepacia* as a probiotic in order to improve the nutritional quality and stability of the culture. Containers of 200 L with 120 L of water were used, inoculated with 300 mL of *B. cepacia* and 0.5 g of the corresponding carbon source, supplied every three days for 30 days. In addition, 1 L of *Navicula* sp. and 1 L of *Nannochloropsis* sp. were added every three days as a food supplement. Population density was recorded every three days. The results showed significant differences among treatments ($P < 0.001$). Macroalgae produced the highest population density: 1,258,701 organisms in 120 L (equivalent to 10,489 org/L), while moringa showed the lowest density: 129,266 organisms (1,077 org/L). Regarding reproductive potential, macroalgae also stood out, with an R_0 of 2,516 offspring per female, a T_c of 26.78 days, and a growth rate r of 0.29. Moringa showed the lowest values ($R_0 = 258$, $r = 0.24$), although its T_c was shorter (22.86 days), indicating faster population regeneration but lower total productivity. In conclusion, the study demonstrates that macroalgae combined with *Burkholderia cepacia* is the most efficient carbon source for the culture of *Daphnia pulex*, achieving high densities and elevated reproductive potential, making it a viable option for the production of live feed in aquaculture.

KEYWORDS: *Daphnia pulex*; *Burkholderia cepacia*; carbon sources; macroalgae; live feed; aquaculture.

1. INTRODUCCIÓN

El cultivo de cladóceros como *Daphnia pulex*, *D. magna* y *Moina micrura* representan una actividad clave en acuicultura, especialmente en países en desarrollo

donde el acceso a alimentos balanceados de alto costo es limitado (Kar et al., 2019). El alimento vivo en la acuicultura en las diferentes fases de desarrollo del cultivo de peces y de algunos crustáceos es ampliamente utilizada por su tamaño pequeño, debido a que presentan un ciclo de vida corto, crecimiento acelerado y por consiguiente alcanzar la madurez sexual de forma rápida permitiéndoles producir una gran cantidad de nuevas crías (Castro et al. 2020). Debido a que son organismos filtradores, pueden alimentarse desde bacterias hasta microalgas unicelulares, las cuales pueden tener diferentes contenidos de carbohidratos, lípidos, vitaminas y minerales, por lo que es posible modificar su contenido nutricional y ser considerados como alimento adecuado para el cultivo de otros organismos acuáticos (Khudeyi et. al. 2016; Yuslan et al., 2021; Taipale et al., 2019; Suryaning et al., 2022).

Además, los cladóceros ofrecen una gran capacidad para crecer sobre sustratos orgánicos de bajo costo (Khan et al., 2020). Por mucho tiempo, el cultivo de estos pequeños crustáceos ha sido el utilizar cultivos de microalgas y levaduras, aunque recientemente se ha tratado de manejar la utilización de bacterias heterótrofas, no solamente para mantener una densidad adecuada, sino la producción de una biomasa enriquecida debido al probiótico producido por estas bacterias. Para ello se han comenzado a utilizar diferentes fuentes de carbono vegetal que permitan la producción de una biomasa bacteriana que permita mantener estas dos características: una densidad adecuada y una biomasa enriquecida (Pimentel et al., Sipaúba et al., 2017; 2016; Samat et al., 2021).

Sin embargo, uno de los principales problemas en su cultivo intensivo es la alta susceptibilidad a colapsos poblacionales asociados con el aumento de amonio no ionizado y la proliferación de epibiontes y flagelados (Rahman et al., 2023). Para mitigar estos problemas, se han desarrollado múltiples métodos de cultivo que incluyen el uso de estiércol de pollo, torta de aceite, harina de soya, levadura seca, e incluso residuos de caldo de pollo fermentados con microorganismos eficientes (EM4) (El-feky y Abo-Taleb, 2020; Setyawan et al., 2021; Bezerra et al., 2021; Ahiwale et al., 2024). Estos sustratos promueven el desarrollo de comunidades microbianas y microalgas que sirven como fuente directa o indirecta de alimento para los cladóceros. No obstante, la eficiencia de conversión del alimento y la producción de biomasa varían significativamente según el tipo de sustrato y las condiciones de cultivo (Gandara et al., 2013; Espinoza-Rodríguez et al. 2024).

Debido a lo anterior, este estudio se centra en la posibilidad de utilizar diferentes fuentes de carbono accesibles a conseguir, que permitan el mantenimiento de una bacteria heterótrofa con capacidad probiótica, que permita no solamente obtener

densidades óptimas para dar de comer a otros organismos acuáticos, sino que además, sean enriquecidas por la bacteria con capacidad probiótica y así obtener mejores resultados para los organismos en cultivo. Se espera que los resultados contribuyan a establecer protocolos de cultivo económicos y sostenibles para las primeras fases de alevinaje y larvas de crustáceos para pequeños productores.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. PREPARACIÓN DE *BURKHOLDERIA CEPACIA*

Del agua del estanque cultivo al exterior, se tomó 1 L de agua el cual fue tamizado por una luz de malla de 5.0 μm . Se tomaron 10 muestras que se sembraron en Cajas de Petri con un medio de cultivo Infusión de Cerebro/Corazón (TSA) marca BDBioxon® para hacer crecer a las diferentes cepas bacterianas. Una vez obtenido su cultivo, se seleccionó la bacteria más abundante y se le realizó una prueba API para determinar el género y la especie. Seleccionada la cepa bacteriana, se colocaron 200 mL en 1 L de Caldo de Soya Tripticaseína marca BDBioxon® para su proliferación y se agregaron 300 mL por tanque experimental de 160 L, para posteriormente, agregar la fuente de carbono (0.5 g cada tercer día).

2.2. CULTIVO DE MICROALGA

Las microalgas empleadas en este experimento fueron *Navicula* sp. y *Nannochloropsis* sp. La microalga parda fue fertilizada con 1 mL de triple 17 (50 g por 500 mL de agua) y 1.5 mL de silicato de sodio pentahidratado (50 g en 500 mL de agua). La microalga *Nannochloropsis* sp. fue fertilizada con 1 mL de triple 17 y 1.5 mL de Bayfolan. A ambas microalgas se le agregó 0.5 g de bicarbonato. Los cultivos se realizaron en recipientes de 10 L y la temperatura se mantuvo entre los 19-21°C.

2.3. FUENTES DE CARBONO UTILIZADAS

Para la experimentación, se utilizaron cinco fuentes de carbono a) café, b) mezquite, c) macroalga, d) moringa y d) almendro. Cada tratamiento experimental fue suministrado cada tercer día con 0.5 g de la fuente de carbono respectiva.

2.4. DISEÑO EXPERIMENTAL

Para el cultivo de los organismos se utilizaron recipientes de plástico de 200 L de capacidad con 120 L de agua. Los cuales fueron inoculados previamente con 300

mL de *Burkholderia cepacia* y 0.5 g de la fuente de carbono durante una semana. Esta inoculación se hizo una sola vez. La siembra inicial de los organismos para todos los tratamientos fue de 500 organismos adultos. Los cultivos se mantuvieron con un periodo de luz/oscuridad 12:12; aireación continua, y a una temperatura promedio de 23-25°C. Cada tercer día se tomaba una muestra de 1 L de la cual se tomaban 10 muestras de 1 mL para obtener la densidad de organismos y así hacer la extrapolación a los litros de cultivo. Para el complemento de alimentación con microalga, cada tercer día se agregaron 1 L de microalga *Navicula* sp. y 1 L de microalga *Nannochloropsis* sp. Los cultivos se mantuvieron durante 30 días.

2.5. PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

Los valores de densidad se introdujeron a una base de datos en Excel para obtener su estadística descriptiva y poder realizar las curvas de crecimiento. El potencial reproductivo de la población se obtuvo utilizando las siguientes fórmulas.

Para obtener la tasa de reproducción (Ro) se utilizó:

$$R_o = \sum l_x * m_x$$

Donde:

l_x : Proporción de sobrevivencia en cada fase

m_x : Organismos producidos por cada individuo superviviente en cada fase

Para obtener el tiempo generacional de la cohorte (T_c) se utilizó:

$$T_c = \frac{\sum x * l_m * m_x}{R_o}$$

Donde:

x = Día de muestreo

l_x = Proporción de sobrevivencia en cada fase

m_x = organismos producidos por cada hembra

R_o = Tasa de reproducción

Para obtener la tasa instantánea de crecimiento (r) se utilizó:

$$r = \frac{\text{Log}_e R_o}{T_c}$$

Donde:

$\text{Log}_e R_o$ = Logaritmo base e de la tasa de reproducción

T_c = tiempo generacional de la cohorte

2.6. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Al valor final de la densidad de cada tratamiento experimental se realizó un análisis de varianza (ANDEVA) de una sola vía para determinar la existencia de diferencias significativas ($P < 0.05$) y una prueba de Tukey de comparación de medias múltiples para determinar la diferencia existente entre los tratamientos.

3. RESULTADOS

En la Tabla 1 se presenta la información de la densidad de los organismos por tratamientos con las cinco fuentes de carbono suministradas.

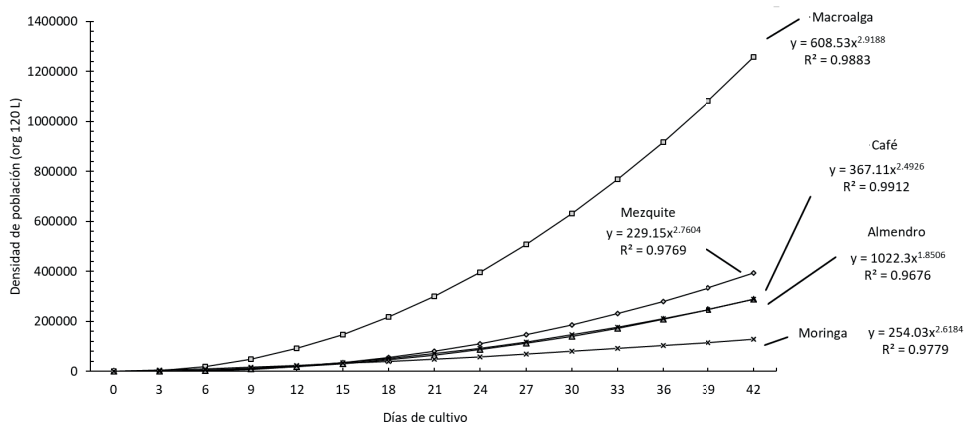
Tabla 1.- Densidad poblacional promedio (\pm D.S.) de *D. pulicaria* en los cinco tratamientos experimentales.

Muestreo	Tratamiento experimental									
	Mezquite		Macroalga		Café		Moringa		Almendro	
0	500		500		500		500		500	
3	958	± 34	2733	± 31	669	± 30	5208	± 51	1176	± 53
6	2234	± 62	18877	± 37	3332	± 57	11035	± 32	5229	± 65
9	8338	± 55	48433	± 54	9236	± 38	17481	± 31	12296	± 31
12	19270	± 55	91400	± 55	18384	± 61	24547	± 22	22375	± 44
15	35030	± 55	147779	± 29	30774	± 33	32232	± 29	35468	± 29
18	55618	± 67	217569	± 32	46407	± 33	40536	± 61	51574	± 30
21	81033	± 55	300770	± 35	65283	± 39	49460	± 59	70693	± 55
24	111277	± 46	397383	± 46	87401	± 51	59003	± 29	92825	± 30
27	146349	± 23	507407	± 41	112762	± 32	69165	± 34	117971	± 57
30	186248	± 43	630843	± 27	141366	± 31	79946	± 62	146130	± 38
33	230976	± 43	767690	± 61	173212	± 22	91347	± 55	177302	± 61
36	280532	± 41	917949	± 62	208301	± 29	103367	± 55	211487	± 33
39	334915	± 27	1081619	± 55	246633	± 61	116007	± 55	248685	± 33
42	394127	± 61	1258701	± 55	288208	± 55	129266	± 67	288897	± 39

Como se puede observar en la Tabla 1, el tratamiento con la Macroalga fue la que obtuvo la mayor densidad de organismos con $1,258,701 \pm 55$ org en 120 L, dando una densidad de $10,489$ org L^{-1} . Siendo el tratamiento de Moringa con menor densidad con $129,266$ org $120 L^{-1}$, con una densidad por litro de $1,077$ org. El análisis de ANDEVA señala que entre todos los tratamientos hay diferencias significativas ($P < 0.001$).

Las curvas de crecimiento y sus fórmulas se muestran en la Fig.1.

Fig.1. Curvas de densidad de crecimiento de *D. pulicaria* en los cinco tratamientos experimentales.



En la Tabla 2 se presentan los valores del potencial reproductivo de los cinco tratamientos experimentales con *D. pulicaria*.

Tabla 2.- Valores promedio del potencial reproductivo de las poblaciones de *D. pulicaria* bajo los cinco tratamientos experimentales de fuente de carbono y microalga.

Variable reproductiva	Tratamiento experimental				
	Mezquite	Macroalga	Café	Moringa	Almendro
Tasa de reproducción (Ro)	787	2516	575	258	577
Tiempo generacional de la cohorte (Tc)	27.67	26.78	27.14	22.86	26.66
Tasa instantánea de crecimiento (r)	0.24	0.29	0.23	0.24	0.24

Como se puede observar en la Tabla 2, el tratamiento con Macroalga fue el que dio los mejores resultados en cuanto a potencial reproductivo de la población ya que cada hembra en promedio puede llegar a producir hasta 2516 individuos y una mejor tasa de crecimiento (0.29). El tratamiento con valores menores fue el de la Moringa con 258 organismos producidos por hembra y una tasa de crecimiento de 0.24. Se puede observar que la tasa de crecimiento de los tratamientos Mezquite, café Moringa y Almendro fueron semejantes. En lo que respecta al tiempo generacional de la cohorte los tratamientos de Mezquite, Macroalga, Café, y Almendro dieron Valores semejantes entre 26 y 27 días. Solo el tratamiento de Moringa tarda en regenerar la población 22 días.

4. DISCUSIÓN

Los cladóceros como *Daphnia pulicaria*, *D. magna*, y *Moina macrocopa*, son reconocidos de importancia en la acuicultura debido a que son parte de la transferencia de energía desde los productores primarios hasta los consumidores superiores, debido a que su contenido proteico (hasta un 50-75% en peso seco) puede ser modificado por el tipo de alimentación que se utilice para su cultivo por su capacidad de filtración (Rasdi et al., 2018, 2021; Herawati et al., 2015, 2016; Hafiz et al., 2024).

Estudios realizados con este pequeño crustáceo demuestran que su densidad poblacional y su calidad nutricional dependen en gran medida del tipo y la concentración de la fuente de carbono orgánico presente en el medio de cultivo (Jasni et al., 2023; Lurtzing et al., 2021; Mohammed et al., 2020, 2022). Desde los trabajos de De Pauw et al. (1981), señalan que el uso de harina de arroz como sustrato orgánico permitió obtener rendimientos de hasta 490 g de peso húmedo por metro cúbico por semana, con una tasa de conversión alimenticia promedio de 2.3 Asimismo, Herawati et al. (2019), utilizó el estiércol de pollo fermentado durante 28 días con *Lactobacillus casei* y *Saccharomyces cerevisiae* mejoró significativamente el perfil de ácidos grasos y aminoácidos de *D. magna*, alcanzando un 9.36% de ácido linoleico y 32.19 ppm de lisina, lo que a su vez incrementó la tasa de crecimiento relativo de larvas de tilapia hasta un 19.98%. Estos mismos resultados se muestran en los trabajos realizados por Muñoz-Mejía y Hurtado-Bocanegra en 2017, utilizando diferentes fuentes de macroalgas para el cultivo de *Daphnia magna*. Así mismo, Panigrahi et. al (2019) quienes trabajaron con plantas con diferente cantidad de protein para el cultivo de *Moina microcura* y Zhang et al. (2020) en *Moina macrocopa*.

El uso de aguas residuales de estanques de acuicultura o efluentes orgánicos también ha demostrado ser una estrategia viable y de bajo costo. La adición de melaza como fuente de carbono adicional estimuló el crecimiento bacteriano, que sirvió como alimento directo para *Moina* spp., alcanzando densidades de hasta 71,558 individuos por 740 litros en cultivos semi-masivos (Holy y Sari., 2020). Esto concuerda con lo señalado por Langis et al. (1988) y Patil et al. (2010), quienes destacaron que las biopelículas bacterianas y las comunidades microbianas asociadas a efluentes pueden constituir una fuente primaria de alimento eficaz para cladóceros, reduciendo la dependencia de microalgas.

Se ha observado que la fermentación de sustratos orgánicos añadiendo probióticos, no solo mejora el perfil nutricional del medio, sino que también permite una mayor digestibilidad y por consiguiente la disponibilidad de nutrientes para los cladóceros. Herawati et al. (2015) demostraron que *D. magna* cultivada en medios fermentados con

L. casei y *S. cerevisiae* presentó un contenido proteico del 75.26% y una sobrevivencia larval de tilapia superior al 98%. Este efecto se atribuye a la acción de enzimas exógenas (proteasas, amilasas, lipasas) producidas por los probióticos, que hidrolizan compuestos complejos y facilitan su asimilación (Herawati et al., 2019). Además, la inclusión de probióticos en el cultivo de cladóceros puede conferir beneficios indirectos a los peces que los consumen. Samat et al. (2021) observaron que *Moina micrura* enriquecida con *Bacillus pochoenensis* mejoró la supervivencia y la resistencia a enfermedades en larvas de tilapia híbrida roja. Esto sugiere que los cladóceros actúan como vectores de microorganismos benéficos, regulando el microbioma intestinal de los depredadores y reduciendo la incidencia de patógenos (Rasdi et al., 2020).

Por otro lado, el uso combinado de estiércol avícola y melaza (Holy and Sari, 2020) ha mostrado resultados superiores a los de fuentes individuales. Mientras que el estiércol solo genera altas concentraciones de amonio no ionizado (NH_3), tóxico para los cladóceros por encima de 0.61 ppm (Leung et al., 2011), la adición de melaza ajusta la relación carbono-nitrógeno (C:N) y promueve la inmovilización bacteriana del nitrógeno, reduciendo la toxicidad y mejorando la calidad del agua (Yuslan et al., 2021). La fermentación con probióticos acelera este proceso, como se evidenció en tratamientos con 28 días de fermentación, donde los niveles de amonio se mantuvieron dentro del rango óptimo (0.03–0.5 ppm) y la densidad poblacional de *Daphnia* fue máxima (Herawati et al., 2018).

En cuanto a la calidad nutricional de los cladóceros producidos, las dietas basadas en estiércol de pollo más probióticos generaron un contenido de cenizas significativamente menor (9.26% vs 21.36% en controles), lo que indica una mayor absorción de materia orgánica y minerales biodisponibles (Herawati et al., 2019; Holy y Sari, 2020). Esto es relevante porque un bajo contenido de cenizas se asocia con una mayor digestibilidad y valor energético para los peces larva.

A pesar de los avances, persisten desafíos en el cultivo intensivo de cladóceros. La acumulación de amonio no ionizado, el agotamiento del oxígeno disuelto y la proliferación de epibiontes (como ciliados del género *Epistylis*) pueden causar colapsos súbitos de la población (Gilbert y Schröder, 2003; Leung et al., 2011). La implementación de sistemas de recirculación acuícola (RAS) y el monitoreo diario de parámetros fisicoquímicos (temperatura, pH, OD, amonio) son prácticas recomendadas para mantener cultivos estables (Dhert et al., 2001). Además, se ha demostrado que el agua destilada no permite la supervivencia de *Daphnia*, mientras que el agua de campo (con microbiota nativa) sí lo hace, resaltando la importancia de las comunidades microbianas autóctonas en el establecimiento del cultivo (Rahman et al., 2023).

La integración de fuentes de carbono de bajo costo (residuos agroindustriales, estiércoles, melaza) con cepas probióticas específicas representa una vía promisoría para la producción sostenible de cladóceros Azhikina et al., 2019). Sin embargo, se requieren más estudios sobre la identificación de compuestos bioactivos secundarios (como ácido tánico y beta-caroteno) presentes en *Daphnia* cultivada bajo estas condiciones, así como sobre la transferencia de estos compuestos a los peces y sus efectos sobre su crecimiento y bienestar Rajarajan et al., 2024). Asimismo, es necesario estandarizar los diferentes protocolos de fermentación de los diferentes compuestos de carbohidratos, así como la selección adecuada de cepas probióticas autóctonas, lo que permitiría maximizar la eficiencia productiva y reducir la variabilidad entre los procesos de cultivo con los diferentes géneros de cladóceros con potencial en la acuicultura (Ahiwale et al., 2024).

REFERENCIAS

Ahiwale S., Changan P., Gotsurya P., Bhong A., Dombale S., Chordiya S., Nale V. and Shitole M. (2024). Preliminary Studies on Low-Cost Laboratory Culture Method for *Daphnia*. International Journal of Zoological Investigations Vol. 10, No. 2, 437-442 (2024).

Ahiwale S., changan p., Gotsuyaya P., Bhong a., Dombale s., Sandip C., Nale V., Mayur S. (2024). Preliminary studies on low-cost laboratory culture method for *Daphnia*. International Journal of Zoological Investigations, 10(2), 437-442.

Azhikina TL, Makhutova ON. (2019). Effects of different food sources on the growth and reproduction of *Daphnia magna*. Russian Journal of Marine Biology, 45(3), 199-205.

Bezerra GS, Fava AF, Baumgarther G, Sebastien NY. Dietary supplementation of cattle manure in *Scenedesmus acuminatus* algae suspension in *daphnia magna* farming. Research Society and Development. 2021; 10(8):1-9.

Castro MJ, Castro MG, Flores GAF, Rivera RAO, Martínez MAM. Population density comparison and reproductive potential of *Daphnia pulex* (Forbes, 1823) fed with chlorophytes (*Scenedesmus* sp. + *Chlorococcum* sp.) and diatoms (*Pinnularia* sp.). Journal of Entomology and Zoology Studies (2020; 8(3):474-478.

De Pauw, N., Laureys, P., Morales, J. (1981). Mass cultivation of *Daphnia magna* (Straus) on ricebran. Aquaculture, 25, 141-152.

Dhert P., Rombaut G., Suantika G., Sorgeloos P. (2001). Advancement of rotifer culture and manipulation techniques in Europe. Aquaculture, 200, 129-146.

El-feky, MMM., Abo-Taleb H. (2020). Effect of feeding with different types of nutrients on intensive culture of the water flea, *Daphnia magna*. Egyptian Journal of Aquatic Biology and Fisheries, 24(1), 655-666.

Espinosa-Rodríguez CA., Lugo-Vázquez A., Montes-Campos LJ., Saavedra-Martínez IM., Sánchez-Rodríguez MR., Peralta-Soriano L., Rivera-De la Parra L. (2024). Effects of Submerged Macrophytes on Demography and Filtration Rates of *Daphnia* and *Simocephalus* (Crustacea: Cladocera). Plants 2024, 13, 1504. <https://doi.org/10.3390/plants13111504>

Gandara M., Galdino RL., Caraballo P. Historia de vida de *Daphnia magna* y *Ceriodaphnia reticulata* en condiciones de laboratorio: uso potencial como alimento para peces. *Revista Colombiana de Ciencia Animal*. 2013; 5(2):340-357.

Gilbert, J.J., Schröder T. (2003). The ciliate epibiont *Epistylis pygmaeum*: selection for zooplankton hosts, reproduction and effect on two rotifers. *Freshwater Biology*, 48(5), 878-893.

Herawati V.E., Nugroho RA., Pinandoyo, Darmanto YS., Hutabarat J. (2018). The effect of fermentation time with probiotic bacteria on organic fertilizer as *Daphnia magna* cultured medium towards nutrient quality, biomass production and growth performance enhancement. *IOP Conference Series: Science* 116:012089. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/116/1/012089>

Herawati VE, Hutabarti J, Pinandoyo P, Rismaningshi N, Karnaradjas O. (2019). Mass Culture of *Daphnia magna* Straus, 1820 in Fermented Medium as Feed to Enhance Nutrient Quality and Growth Performance of Nile Tilapia *Oreochromis niloticus* (Linnaeus, 1758) Larvae. *Asian Fisheries Science* 32 (2019):182–189. <https://doi.org/10.33997/j.afs.2019.32.4.006>

Herawati VE., Hutabarat J., Radjasa OK. (2015). growth and survival rate of Tilapia (*Oreochromis niloticus*) larvae fed by *Daphnia magna* cultured with organic fertilizer resulted from probiotic bacteria fermentation. *HAYATI Journal of Biosciences* 22:169–173. <https://doi.org/10.1016/j.hjb.2015.08.001>

Herawati VE., Nugroho RA., Hutabarat J., Karnaradjasa O. (2016). Profile of amino acids, fatty acids, proximate composition and growth performance of *Tubifex tubifex* culture with different animal wastes and probiotic bacteria. *AACL Bioflux* 9:614–622.

Holy NH., Sari LA. (2020). Growth and density of *Daphnia* sp. in laboratory and semi-mass scale cultures using different organic media. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 441, 012057.

Holy NH., Sari LA. (2020). The effect of catfish and chicken cultivation waste to *Daphnia* sp. Culture. 2nd International Conference on Fisheries and Marine Science. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 441 (2020) 012057. IOP Publishing. doi:10.1088/1755-1315/441/1/0120571.

Jasni J, Yasin NHM, Takritt MS. (2023). The growth of local microalgae in synthetic and agricultural wastewater for aquaculture feed application. *AIP Conference Proceedings* 2023; 2682,050003:1-11. <https://doi.org/10.1063/5.0117773>

Kar S., Das P., Das U., Bimola M., Kar D., Aditiya G. (2019). Culture of the zooplankton as fish food: observations on three freshwater species from Assam, India. *Journal of the Asiatic Society of Bangladesh, Science*, 45(2), 175-184.

Khan MA. Hasan M., Ahmed SK., Harunur R. (2020). Culture of freshwater zooplankton *Daphnia magna* fed with different feed combination. *Bangladesh Journal of Fisheries*, 32(1), 45-52.

Khudiy O., Marchenko M., Cheban L., Khuda L., Kushniryk O., Malishchuk I (2016). Recirculating Aquaculture Systems Wastewater as a Medium for Increase of Phytoplankton and Zooplankton Biomass. *International Letters of Natural Sciences* (2016) 54 1-7.

Langis R., Proulx J., de la Noüe J., Couture P. (1988). Effects of a bacterial biofilm on intensive *Daphnia* culture. *Aquacultural Engineering*, 7, 21-38.

Leung J., Kumar M., Glatz P., Kind K. (2011). Impacts of un-ionized ammonia in digested piggery effluent on reproductive performance and longevity of *Daphnia carinata* and *Moina australiensis*. *Aquaculture*, 310(3-4), 401-406.

- Lurtzing AM, Koetzner AL, & Hintz WD. (2021). Marine macroalgae as a sustainable feed for mass culture of *Daphnia magna* and *Moina macrocopa*. *Aquaculture*, 545, 737231.
- Mohamed M., El-feky M., Abo-Taleb H. (2020). Effect of feeding with different types of nutrients on intensive culture of the water flea, *Daphnia magna* Straus, 1820. *Egyptian Journal of Aquatic Biology & Fisheries Zoology Department, Faculty of Science, Ain Shams University, Cairo, Egypt*. ISSN 1110 – 6131 Vol. 24(1): 655 – 666.
- Mohammed AM, Mamdoh TJ, Mamdouh AH, Bandar AA, Fazlul H. (2022). Use of yeasts in aquaculture nutrition and immunostimulation: A review. *Journal of Applied Biology and Biotechnology*. 2022; 10(5):59-65.
- Muñoz-Mejía G, Hurtado-Bocanegra M. (2017). Macroalgas como fuente de alimento para el cultivo de *Daphnia magna*. *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, 52(1), 145-157.
- Panigrahi A, Sarkar B, Majumder SK. (2019). Effect of different plant protein sources on population growth of *Moina micrura* (Cladocera). *Environmental Science and Pollution Research*, 26(8), 7636-7644. Obtenido de: <https://doi.org/10.1007/s11356-019-04194-7>
- Patil SS., Ward AJ., Kumar MS., Ball AS. (2010). Utilizing bacterial communities associated with digested piggery effluent as a primary food source for the batch culture of *Moina australiensis*. *Bioresource Technology*, 101, 3371-3378.
- Pi Y, Zhang Y, Wang M, Zhang J, Zhang W. (2020). Effects of different diets on the growth and reproduction of *Moina macrocopa*. *Aquaculture Research*, 51(8), 3287-3295.
- Pimentel LJ, Rivera CG, Vázquez GLI, Castro MJ, Ocampo CJA, Castro Mg, Dávila FS And Castro CAE. Population density comparison of *Daphnia pulex* (Linnaeus, 1758) fed with bacteria obtained from Biofloc system. *Journal of Entomology and Zoology Studies* 2016; 4(6): 612-616.
- Rahman H., Azani N, Suhaimi H., Rohana YS., Yuslan A., Wan NR. (2023). A Review on Different Zooplankton Culturing Techniques and Common Problems Associated with Declining Density. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 1147, 012012.
- Rahman H., Azani N, Suhaimi H., Rohana RY., Yuslan A., Wan NR. (2024). A Review on Different Zooplankton Culturing Techniques and Common Problems Associated with Declining Density. *International Conference on Sustainable Fisheries and Marine 2022 (INFISMA-2022)*. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 1147 (2023) 012012. *IOP Publishing* doi:10.1088/1755-1315/1147/1/012012.
- Rajarajan A., Wolinska J., Walser JC., Tardent N., Käser S., Keller E., Spaa P. (2024). *Daphnia*-associated bacterial communities correlate with diet quantity, environmental conditions, and epidemic size across natural outbreaks. *Limnology and Oceanography*. 70, 2025, 2053–2066.
- Rasdi NW., Ikhwanuddin M., Syafika CA., Azani N., Ramli A. (2021). Effects of using enriched copepod with microalgae on growth, survival, and proximate composition of giant freshwater prawn (*Macrobrachium rosenbergii*). *Iranian Journal of Fisheries Sciences*, 20, 986-1003.
- Rasdi NW., Suhaimi H., Yuslan A., Sung YY., Ikhwanuddin M., Omar SS., Qin JG., Kassim Z., Yusoff, FM. (2018). Effect of mono and binary diets on growth and reproduction of cyclopoid copepod. *Aquaculture, Aquarium, Conservation & Legislation*, 11(5), 1658-1671.
- Samat NA., Yusoff FM., Rasdi NW., Karim M. (2021). The Efficacy of *Moina micrura* Enriched with Probiotic *Bacillus pochoenensis* in Enhancing Survival and Disease Resistance of Red Hybrid Tilapia (*Oreochromis* spp.) Larvae. *Antibiotics*, 10(8), 989.

Setyawan ST., Cahyoko Y., Sari, LA. (2021). The effect of providing feed from combination of chicken broth and chicken manure on the nutritional value of *Daphnia magna*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 718, 012045.

Sipaúba-Tavares LH, Bachion MA, Rocha O. (2017). Effects of food quality on growth and reproduction of a tropical cladoceran. Acta Limnologica Brasiliensia, 29, e13. Obtenide de: <https://doi.org/10.1590/s2179-975x5716>

Taipale SJ, Aalto SL, Galloway AWE, Kuoppama K, Nzobeuh P, Peltomaa E. (2019). Eutrophication and browning influence on *Daphnia* nutritional ecology. Inland Waters. <https://doi.org/10.1080/20442041.2019.1574177>

Trinita ST., Cahyoko Y., Aprilianita LS. (2022). Providing feed from a mixed of chicken broth and chicken manure with different dosages on nutritional content *Daphnia magna*. INCOFIMS-2021. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 1036 (2022) 012105. IOP Publishing doi:10.1088/1755-1315/1036/1/0121051.

Yuslan A., Najuwá S., Hagiwara A., Ghaffar MA., Suhaimi H., Rasdi NW. (2021). Production performance of *Moina macrocopa* (Straus 1820) cultured in different salinities: effect on growth, survival, reproduction, and fatty acid composition of the neonates. Diversity, 13, 105. Discusión.

CAPÍTULO 13

DENSIDAD POBLACIONAL Y POTENCIAL PRODUCTIVO DE *Daphnia magna* UTILIZANDO CINCO ALIMENTOS INERTES (SALVADO DE TRIGO, LEVADURA, FRIJOL, ARROZ Y RÁBANO) Y DOS MICROALGAS (*Chlorella vulgaris* y *Navicula spp*), EN TINAS DE 120 L (20°±2°C) Y 180 L (23°±2°C)

Data de submissão: 01/06/2026

Data de aceite: 16/06/2026

Jorge Castro Mejía

División de Ciencias Biológicas y de la Salud¹
Universidad Autónoma Metropolitana
Unidad Xochimilco
Ciudad de México, CDMX, México
<https://orcid.org/0000-0002-5632-2581>

Germán Castro Mejía

División de Ciencias Biológicas y de la Salud¹
Universidad Autónoma Metropolitana
Unidad Xochimilco
Ciudad de México, CDMX, México
<https://orcid.org/0000-0003-3007-1005>

José Antonio Mata Sotres

División de Ciencias Biológicas y de la Salud¹
Universidad Autónoma Metropolitana
Unidad Xochimilco
Ciudad de México, CDMX, México
<https://orcid.org/0000-0001-5817-3025>

María del Carmen Monroy Dosta

División de Ciencias Biológicas y de la Salud¹
Universidad Autónoma Metropolitana
Unidad Xochimilco
Ciudad de México, CDMX, México
<https://orcid.org/0000-0002-1856-0511>

Andrés Elías Castro Castellón

División de Ciencias Biológicas y de la Salud¹
Universidad Autónoma Metropolitana
Unidad Xochimilco
Ciudad de México, CDMX, México
<https://orcid.org/0000-0001-7696-2597>

Arnulfo Misael Martínez Meingüer

División de Ciencias Biológicas y de la Salud¹
Universidad Autónoma Metropolitana
Unidad Xochimilco
Ciudad de México, CDMX, México
<https://orcid.org/0000-0002-6255-4901>

José Alberto Ramírez Torrez

División de Ciencias Biológicas y de la Salud¹
Universidad Autónoma Metropolitana
Unidad Xochimilco
Ciudad de México, CDMX, México
<https://orcid.org/0000-0002-3321-6604>

RESUMEN: Se utilizaron cinco alimentos inertes (salvado de trigo, levadura, frijol, arroz y rábano) combinados con dos microalgas (*Chlorella vulgaris* y *Navicula spp*), sobre la densidad poblacional y potencial reproductivo de *Daphnia magna* en tinas de 120 L (20°±2°C) y 180 L (23°±2°C), durante 42 días. Además, se incorporó la bacteria *Burkholderia cepacia* para fermentar las fuentes de carbono. Los resultados mostraron que el tratamiento con rábano produjo la mayor densidad poblacional en ambos sistemas: 1.774.981

¹Depto. El Hombre y su Ambiente, Laboratorio de Producción de Alimento Vivo y Biofloc. Cal. del Hueso No.1100. Alcaldía Coyoacan. CP. 04960. Ciudad de México, México.

organismos (9.861 org/L) en tinas de 120 L y 2.750.017 organismos (15.278 org/L) en tinas de 180 L. El frijol presentó los valores más bajos (378.732 y 784.374 organismos respectivamente). El análisis estadístico (ANDEVA) reveló diferencias significativas entre todos los tratamientos ($P < 0.001$). En cuanto al potencial reproductivo, el rábano también destacó con la mayor tasa de reproducción (R_0 : 3.549 en 120 L; 5.499 en 180 L) y la tasa instantánea de crecimiento más alta (r : 0,42 y 0,44 respectivamente). El tiempo generacional fue similar en todos los tratamientos (~19,5 días). Las temperaturas más altas (23°C) favorecieron mayores densidades poblacionales. Se concluye que el uso de fuentes de carbono terrestres fermentadas, combinadas con microalgas y bacterias probióticas, permite producir biomasa de *D. magna* de manera económica y eficiente, reduciendo la dependencia de alimentos vivos costosos como *Artemia*, manteniendo la calidad nutricional necesaria para la larvicultura de peces y crustáceos.

PALABRAS CLAVE: *Daphnia magna*; *Burkholderia cepacia*; fuentes de carbono; microalgas; biomasa; larvicultura.

POPULATION DENSITY AND PRODUCTIVE POTENTIAL OF *Daphnia Magna* USING FIVE INERT FOODS (WHEAT BRAN, YEAST, BEAN, RICE, AND RADISH) AND TWO MICROALGAE (*Chlorella vulgaris* and *Navicula spp.*) IN 120-L TANKS (20 ± 2 °C) AND 180-L TANKS (23 ± 2 °C)

ABSTRACT: Five inert feeds (wheat bran, yeast, bean, rice, and radish) combined with two microalgae (*Chlorella vulgaris* and *Navicula spp.*) were evaluated for their effect on the population density and reproductive potential of *Daphnia magna* in 120 L tanks (20 ± 2 °C) and 180 L tanks (23 ± 2 °C) over a 42-day period. In addition, the bacterium *Burkholderia cepacia* was incorporated to ferment the carbon sources. The results showed that the treatment with radish produced the highest population density in both systems: 1,774,981 organisms (9,861 org/L) in 120 L tanks and 2,750,017 organisms (15,278 org/L) in 180 L tanks. The bean treatment showed the lowest values, with 378,732 and 784,374 organisms, respectively. Statistical analysis (ANOVA) revealed significant differences among all treatments ($P < 0.001$). Regarding reproductive potential, radish also stood out with the highest reproductive rate (R_0 : 3.549 in 120 L; 5.499 in 180 L) and the highest instantaneous growth rate (r : 0.42 and 0.44, respectively). Generation time was similar across all treatments (~19.5 days). Higher temperatures (23 °C) favored greater population densities. It is concluded that the use of fermented terrestrial carbon sources, combined with microalgae and probiotic bacteria, allows the economical and efficient production of *D. magna* biomass, reducing dependence on costly live feeds such as *Artemia*, while maintaining the nutritional quality required for fish and crustacean larviculture.

KEYWORDS: *Daphnia magna*; *Burkholderia cepacia*; carbon sources; microalgae; biomass; larviculture.

1. INTRODUCCIÓN

Los alevines de peces, así como larvas de crustáceos dependen exclusivamente de presas vivas durante sus primeras fases de vida, debido que poseen un sistema digestivo inmaduro, que carece de las enzimas suficientes (Cahu y Infante, 2001; Kolkovski, 2001).

Sin embargo, el problema se encuentra en la formulación de dietas económicas, de fácil obtención, y capaces de sostener altas tasas de crecimiento y reproducción. Es aquí en donde entra el cultivo de este cladóceros *Daphnia magna*, debido a la capacidad de poseer un 45-70% de proteína y 11-27% de lípidos (Macedo y Pinto-Coelho, 2001), además de ser una fuente natural de enzimas digestivas, vitaminas y minerales esenciales que los alimentos inertes no pueden igualar (Conceição et al., 2010; Radhakrishnan et al., 2020).

Tradicionalmente, se han utilizado dietas únicas (monodietas) para el cultivo de cladóceros, como microalgas (*Scenedesmus*, *Chlorella*, *Euglena*), levadura (*Saccharomyces cerevisiae*) o subproductos orgánicos (estiércol bovino, harinas vegetales). Las microalgas vivas pueden aportar proteínas con diferentes concentraciones, pero lo más importante son los ácidos grasos poliinsaturados (PUFAs), incluyendo EPA (C20:5n-3) y DHA (C22:6n-3), que son esenciales para el desarrollo de los peces (Brett y Müller-Navarra, 1997; Eryalçın y Zeybek, 2025). No obstante, el cultivo de microalgas requiere infraestructura, personal calificado y condiciones controladas, lo que incrementa los costos operativos (Becker, 2004). Por otro lado, la levadura es de bajo costo y fácil de almacenar, pero deficiente en ácidos grasos altamente insaturados (HUFAs), lo que limita su capacidad para sostener poblaciones densas y nutricionalmente completas (Turcihan et al., 2022). Los subproductos como el estiércol bovino, aunque abundantes y baratos, pueden presentar variabilidad en su composición y riesgos microbiológicos si no se procesan adecuadamente (Bezerra et al., 2021).

Frente a estas limitaciones, las dietas mixtas han demostrado ser superiores. Khan et al. (2020) encontraron que la combinación de levadura (50 g/L) con agua verde (25 mL/L) produjo la mayor densidad poblacional de *D. magna* (207,1 ind/L) en comparación con dietas simples. De manera similar, Bezerra et al. (2021) reportaron que la mezcla de la microalga *Scenedesmus acuminatus* con estiércol bovino generó una biomasa total de 1032,37 g, muy por encima de la obtenida con cada componente por separado. Esta sinergia se explica porque las microalgas aportan HUFAs y proteínas de alta calidad, mientras que la levadura o el estiércol proveen vitaminas del complejo B, carbohidratos y nitrógeno orgánico que estimulan la actividad de filtración y la reproducción partenogenética (Herawati et al., 2015; Lari et al., 2018). Además, la suplementación con fuentes ricas en aminoácidos esenciales (arginina, histidina, treonina) favorece la reproducción continua y previene la formación de huevos de resistencia (efipios), según lo demostrado por Fink et al. (2011) y Koch et al. (2011, 2012) en *Daphnia*.

Aunque se sabe que el uso de microalgas vivas o levadura activa presentan ventajas como la posibilidad de mantenerse en la columna de agua y disponible

permanentemente para los cladóceros; no se degradan rápidamente ni generan contaminación orgánica severa; y se conservan sus enzimas y nutrientes bioactivos en todo momento, no obstante, los alimentos inertes ofrecen ventajas logísticas importantes: mayor vida útil, estandarización nutricional y facilidad de manejo. Eryalçin y Zeybek (2025) evaluaron cuatro productos microalgales comerciales (Algome®, Naturiga®, AlgomeGrow®, ProteinPlus®) y encontraron que la dieta ProteinPlus® (rica en DHA, 34,88% del total de ácidos grasos) logró la mayor supervivencia (68%) en *D. magna*, mientras que la dieta Naturiga® (con *Spirulina platensis* seca) elevó el contenido proteico de los cladóceros a 55,66%. Estos resultados indican que los alimentos inertes, si están bien formulados, pueden igualar o incluso superar a ciertos alimentos vivos en parámetros específicos. Además, la combinación de ambos tipos (co-alimentación o co-feeding) ha mostrado resultados prometedores: mezclar microalgas vivas con dietas secas permite aprovechar lo mejor de ambas (Lazo et al., 2000; Cahu y Infante, 2001).

Actualmente, el uso de fuentes de carbono se ha comenzado a estudiar para el cultivo de este pequeño crustáceo, las cuales deben de ser secadas y pulverizadas para su posterior fermentación y por consiguiente, la aplicación de la biomasa bacteriana resultante. Esta biomasa resultante heterótrofa con capacidad probiótica no solamente permite el uso de los compuestos nitrogenados del sistema producidos, sino el de incorporación de otras sustancias nutricionales para el mejoramiento en el crecimiento de las poblaciones como lo son vitaminas (complejo B) y ácidos grasos esenciales.

Por lo anterior, es importante considerar el manejo de estos crustáceos útiles para la acuicultura de peces y crustáceos en sus primeros estadios, utilizando fuentes de carbono de origen terrestre fácil de conseguir como lo es el salvado de trigo, levadura, frijol, arroz y rábano, los cuales son ricos en vitamina B₁₂, junto con el suministro de una combinación de microalga verde y parda, ricas en ácidos grasos esenciales.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. PREPARACIÓN DE BURKHOLDERIA CEPACIA

Previo a la introducción de los cladóceros, en las tinas de cultivo se colocaron 200 mL del cultivo de la cepa bacteriana *Burkholderia cepacia* en 1 L de Caldo de Soya Tripticaseina marca BDBioxon® para incrementar su densidad. De este cultivo, se tomaron 300 mL por tratamiento experimental y se agregaron 30 mL de la fuente de carbono para las tinas de 120 L y 50 mL para las tinas de 180 L. En estas condiciones, se mantuvieron los tratamientos durante 1 semana.

2.2. DISEÑO EXPERIMENTAL

Se utilizaron 500 organismos adultos de *Daphnia magna* por tratamiento experimental (salvado de trigo, levadura, frijol, arroz y rábano). Los organismos fueron introducidos en tinas de 120 L y 180 L. Los recipientes de 120 L se pusieron a una temperatura de $20^{\circ}\pm 2^{\circ}\text{C}$ y las tinas de 180 L a $23^{\circ}\pm 2^{\circ}\text{C}$. En ambas tinas de cultivo el pH se mantuvo en un rango entre 7.9 a 8.1. Se introdujo una fuente de aire y luz 12:12 durante 42 días.

2.3. PREPARACIÓN DEL ALIMENTO INERTE

El salvado de trigo, el arroz, el frijol y el rábano fue deshidratado durante 24 horas a 60°C , para posterior ser pulverizados en un molino eléctrico, y almacenados en frascos de vidrio. De cada tratamiento experimental (rábano: *Raphanus sativus*, la levadura: *Saccharomyces cerevisiae*, el salvado de trigo: *Triticum aestivum* L), el frijol: *Phaseolus vulgaris*, y el arroz: *Oryza sativa* se tomaron 50 g los cuales se colocaron en un recipiente con 200 mL de agua en una licuadora durante tres minutos. La mezcla se pasó por un tamiz de $20\ \mu\text{m}$ y del líquido obtenido, se tomarán 30 mL para las tinas de 120 L y 50 mL para las tinas de 180 L. Este alimento fue suministrado cada tercer día.

2.4. CULTIVO DE MICROALGAS

Además del alimento inerte, se suministraron las microalgas en partes iguales de *Chlorella vulgaris* y *Pinnularia* sp. Cada tercer día se suministraron 1 L de microalga verde y 1 L de microalga parda. Los cultivos se realizaron en recipientes de 20 L de plástico con luz y aireación continua y una temperatura entre $19\text{-}21^{\circ}\text{C}$. Como fertilizante para la microalga *Chlorella vulgaris* se utilizaron 1.5 mL de Triple 17 (N, P, K) (solución de 200 g Triple 17 en 500 mL de agua) y 1.5 mL de Bayfolan® (solución 1 kg en 4 L de agua). Para la microalga *Pinnularia* sp. se utilizaron 1.5 mL de Triple 17 y 1.5 mL de silicato de sodio heptahidratado. Para ambas microalgas se agregaron $\frac{1}{4}$ de cucharadita de bicarbonato de sodio (NaHCO_3).

2.5. DENSIDAD POBLACIONAL

Cada tercer día, se tomaron 10 L de agua, se tamizaron por un tamiz de $20\ \mu\text{m}$ y la población obtenida se colocó en 1 L de agua. De este litro de agua se tomaron 10 muestras de 10 mL para realizar un conteo y promedio de la población.

2.6. PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

Para obtener la estadística descriptiva de la densidad de organismos por muestreo, los valores se introdujeron en una base de datos de Excel 2016 y obtener sus curvas de crecimiento. El potencial reproductivo de la población se obtuvo utilizando las siguientes fórmulas.

Para obtener la tasa de reproducción (R_0) se utilizó:

$$R_0 = \sum l_x * m_x$$

Donde:

l_x : Proporción de sobrevivencia en cada fase

m_x : Organismos producidos por cada individuo superviviente en cada fase

Para obtener el tiempo generacional de la cohorte (T_c) se utilizó:

$$T_c = \frac{\sum x * l_m * m_x}{R_0}$$

Donde:

x = Día de muestreo

l_x = Proporción de sobrevivencia en cada fase

m_x = organismos producidos por cada hembra

R_0 = Tasa de reproducción

Para obtener la tasa instantánea de crecimiento (r) se utilizó:

$$r = \frac{\text{Log}_e R_0}{T_c}$$

Donde:

$\text{Log}_e R_0$ = Logaritmo base e de la tasa de reproducción

T_c = tiempo generacional de la cohorte

2.7. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Se realizó un análisis de varianza (ANDEVA) de un factor para determinar las diferencias existentes entre los tratamientos con respecto a la densidad poblacional, tanto en las tinas de 120 L, como en las de 180 L. Al encontrar diferencias significativas ($P < 0.05$), se realizó una prueba de medias múltiples con la ayuda de la prueba de Tukey, para determinar entre qué tratamientos existe la diferencia significativa.

3. RESULTADOS

Tinas de 120 L (20°±2°C)

En la Tabla 1 se presenta la información de la densidad de los organismos por tratamientos con las cinco fuentes de carbono suministradas y microalga.

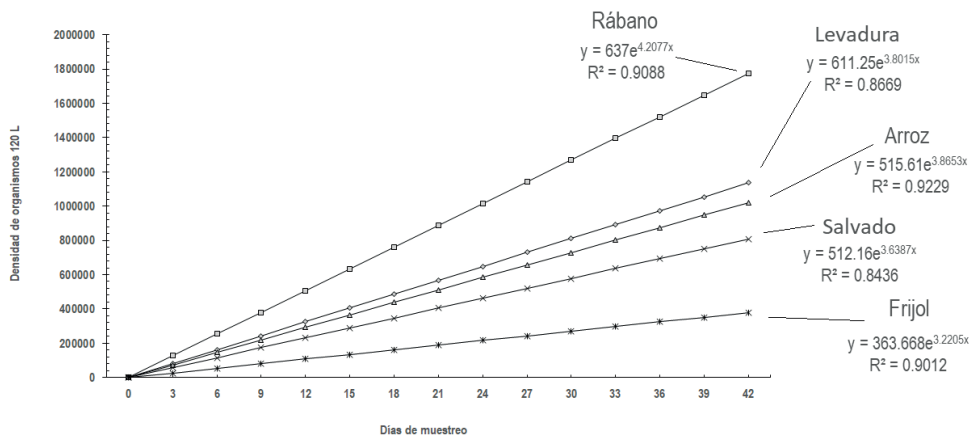
Tabla 1.- Densidad poblacional promedio (±D.S.) de *D. pulicaria* en los cinco tratamientos experimentales.

Muestreo	Tratamiento experimental									
	Rábano		Levadura		Arroz		Salvado		Frijol	
0	500	±30	500	±35	500	±14	500	±27	500	±20
3	126784	±153	81147	±120	72946	±222	57806	±346	27052	±315
6	253569	±144	162294	±298	145891	±298	115612	±112	54105	±194
9	380353	±310	243441	±225	218837	±211	173418	±351	81157	±118
12	507137	±138	324588	±223	291782	±269	231224	±328	108209	±294
15	633922	±340	405735	±296	364728	±186	289030	±355	135261	±274
18	760706	±166	486882	±279	437673	±213	346835	±309	162314	±144
21	887490	±348	568030	±299	510619	±270	404641	±158	189366	±224
24	1014275	±145	649177	±171	583564	±326	462447	±288	216418	±321
27	1141059	±242	730324	±283	656510	±356	520253	±321	243471	±280
30	1267843	±255	811471	±129	729455	±346	578059	±221	270523	±335
33	1394628	±179	892618	±147	802401	±134	635865	±121	297575	±255
36	1521412	±254	973765	±281	875347	±301	693671	±111	324627	±294
39	1648196	±356	1054912	±257	948292	±337	751477	±169	351680	±334
42	1774981	±219	1136059	±314	1021238	±179	809283	±116	378732	±216

Como se puede observar en la Tabla 1, el tratamiento con Rábano fue el que obtuvo la mayor densidad de organismos con 1,774,981±219 org en 180 L, dando una densidad de 9,861 org L⁻¹. Siendo el tratamiento de Frijol con menor densidad con 378,732 org 180 L⁻¹, con una densidad por litro de 2,104 org. El análisis de ANDEVA señala que entre todos los tratamientos hay diferencias significativas (P<0.001).

Las curvas de crecimiento y sus fórmulas se muestran en la Fig.1.

Fig.1. Curvas de crecimiento de la densidad de organismos de *D.pulicaria* en los cinco tratamientos experimentales en tinas de 120 L (20°±2°C).



En la Tabla 2 se presentan los valores del potencial reproductivo de los cinco tratamientos experimentales con *D. pulicaria*.

Tabla 2.- Valores promedio del potencial reproductivo de las poblaciones de *D. pulicaria* bajo los cinco tratamientos experimentales de fuente de carbono y microalga.

Variable reproductiva	Tratamiento experimental				
	Rábano	Levadura	Arroz	Salvado	Frijol
Tasa de reproducción (Ro)	3549	2271	2041	1618	756
Tiempo generacional de la cohorte (Tc)	19.51	19.51	19.51	19.51	19.53
Tasa instantánea de crecimiento (r)	0.42	0.40	0.39	0.38	0.34

Como se puede observar en la Tabla 2, el tratamiento con Rábano fue el que dio los mejores resultados en cuanto a potencial reproductivo de la población ya que cada hembra en promedio puede llegar a producir hasta 3,549 individuos y una mejor tasa de crecimiento (0.42). El tratamiento con valores menores fue el de Frijol con 756 organismos producidos por hembra y una tasa de crecimiento de 0.34. Se puede observar que la tasa de crecimiento de los tratamientos levadura, arroz, y salvado fueron semejantes. En lo que respecta al tiempo generacional de la cohorte, todos los tratamientos experimentales presentaron semejante valor (19.5 días).

Tinas de 180 L (23°±2°C)

En la Tabla 3 se presenta la información de la densidad de los organismos por tratamientos con las cinco fuentes de carbono suministradas y microalga.

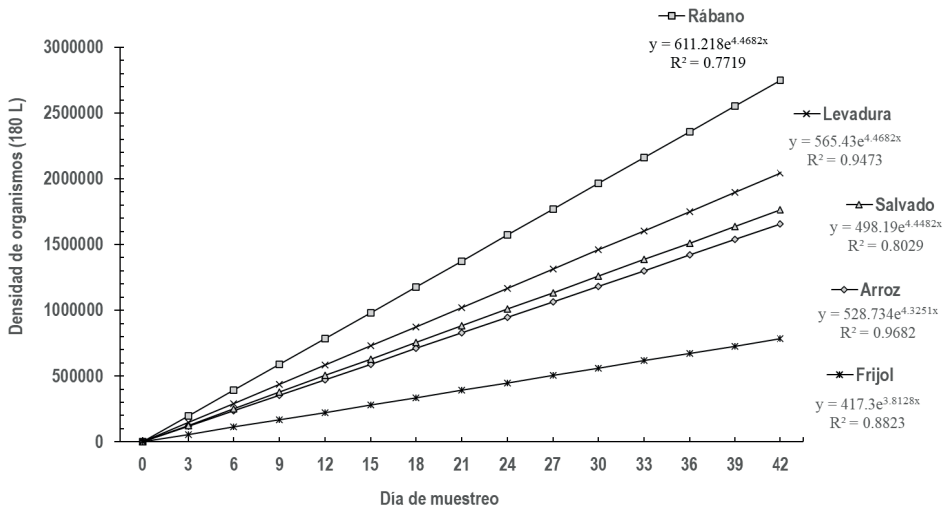
Tabla 3.- Densidad poblacional promedio (\pm D.S.) de *D. pulicaria* en los cinco tratamientos experimentales.

Muestreo	Tratamiento experimental									
	Rábano		Levadura		Arroz		Salvado		Frijol	
0	500	± 38	500	± 28	500	± 43	500	± 43	500	± 50
3	196430	± 169	145913	± 265	118303	± 500	126023	± 209	56027	± 452
6	392860	± 479	291826	± 361	236605	± 591	252046	± 359	112053	± 517
9	589289	± 535	437738	± 469	354908	± 510	378069	± 571	168080	± 552
12	785719	± 401	583651	± 352	473210	± 381	504093	570	224107	± 303
15	982149	± 212	729564	± 196	591513	± 282	630116	± 328	280133	± 198
18	1178579	± 235	875477	± 180	709815	± 290	756139	± 295	336160	± 447
21	1375008	± 301	1021390	± 225	828118	± 310	882162	± 196	392187	± 442
24	1571438	± 534	1167303	± 380	946420	± 426	1008185	± 288	448214	± 389
27	1767868	± 221	1313215	± 432	1064723	± 356	1134208	± 514	504240	± 353
30	1964298	± 219	1459128	± 331	1183025	± 307	1260231	± 215	560267	± 178
33	2160728	± 233	1605041	± 504	1301328	± 494	1386254	± 589	616294	± 394
36	2357157	± 265	1750954	± 484	1419630	± 590	1512278	± 320	672320	± 272
39	2553587	± 367	1896867	± 548	1537933	± 524	1638301	± 298	728347	± 283
42	2750017	± 278	2042780	± 393	1656235	± 545	1764324	± 192	784374	± 250

Como se puede observar en la Tabla 3, el tratamiento con Rábano fue el que obtuvo la mayor densidad de organismos con 2,750,017 \pm 278 org en 180 L, dando una densidad de 15,278 org L⁻¹. Siendo el tratamiento de Frijol con menor densidad con 784,374 org 180 L⁻¹, con una densidad por litro de 4,358 org. El análisis de ANDEVA señala que entre todos los tratamientos hay diferencias significativas (P<0.001).

Las curvas de crecimiento y sus fórmulas se muestran en la Fig.2.

Fig.2. Curvas de crecimiento de la densidad poblacional de *D. pulicaria* en los cinco tratamientos experimentales.



En la Tabla 4 se presentan los valores del potencial reproductivo de los cinco tratamientos experimentales con *D. pulicaria*.

Tabla 4.- Valores promedio del potencial reproductivo de las poblaciones de *D. pulicaria* bajo los cinco tratamientos experimentales de fuente de carbono y microalga.

Variable reproductiva	Tratamiento experimental				
	Rábano	Levadura	Arroz	Salvado	Frijol
Tasa de reproducción (Ro)	5499	4085	3311	3528	1568
Tiempo generacional de la cohorte (Tc)	19.50	19.50	19.51	19.51	19.51
Tasa instantánea de crecimiento (r)	0.44	0.43	0.42	0.42	0.38

Como se puede observar en la Tabla 4, el tratamiento con Rábano fue el que dio los mejores resultados en cuanto a potencial reproductivo de la población ya que cada hembra en promedio puede llegar a producir hasta 5,499 individuos y una mejor tasa de crecimiento (0.44). El tratamiento con valores menores fue el de Frijol con 1568 organismos producidos por hembra y una tasa de crecimiento de 0.38. Se puede observar que la tasa de crecimiento de los tratamientos levadura, arroz, y salvado fueron semejantes. En lo que respecta al tiempo generacional de la cohorte, todos los tratamientos experimentales presentaron semejante valor (19.5 días).

4. DISCUSIÓN

El cultivo de *Daphnia magna* en el laboratorio depende de la disponibilidad de dietas, sean el uso de microalgas vivas o dietas inertes como diferentes fuentes de carbono, deben de satisfacer los requerimientos nutricionales, especialmente en términos de proteínas, lípidos y ácidos grasos esenciales (Lampert y Brendelberger, 1996; Kilham et al., 1997). Sin embargo, el alto costo y la limitada disponibilidad de alimentos vivos como las microalgas y las levaduras han impulsado la búsqueda de fuentes alternativas económicas y localmente accesibles (Khan et al., 2020; Radhakrishnan et al., 2020). Los resultados de los estudios aquí analizados demuestran que las dietas mixtas o suplementadas con diferentes fuentes de carbono que permitan la producción de una biomasa bacteriana con ciertas características probióticas pueden mejorar significativamente el crecimiento, la supervivencia y el perfil nutricional de *D. magna* en comparación con dietas simples o la ausencia de alimentación.

Khan et al. (2020) observaron que la combinación de levadura (50 g/L) más agua verde (25 mL/L) produjo la mayor densidad poblacional de *D. magna* (207,1 ind/L), superando ampliamente al control sin alimento (23,8 ind/L) y a la dieta Tygb (levadura +

arveja + harina). Este patrón coincide con lo reportado por Bezerra et al. (2021), donde la dieta mixta (microalga *Scenedesmus acuminatus* + estiércol bovino) generó una biomasa total de 1032,37 g, muy superior a la obtenida solo con microalga (473,13 g) o solo con estiércol (245,79 g). La mejora observada con dietas combinadas se atribuye a un efecto sinérgico: mientras que las microalgas aportan proteínas de alta calidad y ácidos grasos poliinsaturados (PUFAs), los suplementos orgánicos como la levadura o el estiércol proveen vitaminas del complejo B, carbohidratos y nitrógeno orgánico que estimulan la reproducción partenogénica y la tasa de filtración (Lari et al., 2018; Turcihan et al., 2022). Lo anterior se comprueba con esta investigación en donde se puede observar una mayor producción de organismos por litro de cultivo (9,200-16,600 org por litro). Sin embargo, cuando solamente se utilizan fermentos a base de estiércol bovino (Bezerra et al., 2021) mostraron la menor producción de biomasa (81,93 g), aunque paradójicamente generaron el mayor contenido proteico en *D. magna* (2,56% vs 1,32-2,17%). Esto sugiere que la calidad nutricional (proteína bruta) no siempre se correlaciona con la productividad en biomasa, debido a que estos fermentos pueden ser promotores de biomasa bacteriana capaces de incorporar proteína a la dieta, sino también otros compuestos importantes como probióticos que ayuden a digerir mejor los nutrientes.

Se ha demostrado que la incorporación de sustancias fermentadas que permitan la proliferación de una biomasa bacteriana heterótrofa no solo permite la disminución de los compuestos nitrogenados en el medio de cultivo, sino que los productos producidos por estas son ricos en probióticos, vitaminas, y en ácidos grasos esenciales para los cladóceros. Esto se demuestra en los trabajos de Zeybek et al. (2023) y Eryalçin y Zeybek (2025) los cuales señalan que la composición de ácidos grasos de *D. magna* es consecuencia de la dieta añadida, especialmente para ácidos grasos altamente insaturados (HUFAs) como DHA (C22:6n-3) y EPA (C20:5n-3). La dieta comercial ProteinPlus® (PP) –rica en DHA (34,88% del total de ácidos grasos) – elevó significativamente la supervivencia (68%) y el contenido de n-3 HUFA en *D. magna*. Esto es consistente con lo señalado por Wacker y Martin-Creuzburg (2007) y Martin-Creuzburg et al. (2010), quienes reportaron que *Daphnia* no puede sintetizar de novo HUFAs a partir de ácidos grasos de 18 carbonos, requiriendo su suministro directo en la dieta. Además, Turcihan et al. (2022) encontraron una correlación lineal positiva entre los niveles de ácido oleico (C18:1n-9), Σ n-3 y Σ n-3 HUFA en la dieta y en el cuerpo de *D. magna*, lo que subraya la necesidad de formular dietas con perfiles lipídicos específicos, ya sean el uso de microalgas ricas o productoras de estos compuestos o con biomasa bacteriana capaz de producirlos o ser los intermediarios de sustancias precursoras

para producirlos por el organismo en cultivo. Esto mismo estaría sucediendo con los aminoácidos arginina e histidina, los cuales estimulan la producción partenogenética de los cladóceros, previniendo la producción de epípsios (huevos de resistencia) y así poder tener una producción continua de biomasa (Fink et al., 2011; Koch et al., 2011, 2012; Eryalçın y Zeybek, 2025).

Se han realizado trabajos utilizando el estiércol bovino seco y tamizado como sustrato orgánico (Bezerra et al., 2021) como una alternativa de bajo costo, resultó en menor producción. Sin embargo, obtuvo un mejor resultado proteico en la biomasa producida en *D. magna*, cuando esta se comparó añadiendo una dieta mixta de microalgas. Resultados similares fueron reportados por Herawati et al. (2015) y Magouz et al. (2021), quienes observaron que el uso y aplicación de fertilizantes orgánicos mejoran la productividad de *Daphnia*. Lo cual sucedió con los resultados de esta investigación utilizando las diferentes fuentes de carbono empleadas, junto con microalgas y la incorporación de la bacteria para acelerar la producción de una mayor biomasa bacteriana. Sin embargo, Khan et al. (2020), demostraron que el uso de una mezcla de levadura, arveja verde en polvo y harina integral (Tygb) y obtuvieron una densidad máxima de 110,5 ind/L – inferior a la dieta con levadura+agua verde. Esto indica que no todos los suplementos vegetales son igualmente asimilables. La presencia de carbohidratos complejos y fibra en la harina puede reducir la digestibilidad, tal como advierten Cheban et al. (2017) para *D. magna* alimentada con microalgas de pared celular gruesa. Es probable que esto haya sucedido con la dieta experimental utilizando frijol como fermento. Además, los resultados de esta investigación podrían respaldar la viabilidad económica del cultivo de cladóceros con insumos locales (levadura, estiércol, harinas vegetales) como estrategia para disminuir la dependencia de otros organismos como los nauplios de *Artemia* o la utilización de otras dietas importadas de alto costo.

Pese a los resultados encontrados en esta investigación persiste la problemática de saber con una mayor eficacia la calidad nutricional de los subproductos orgánicos, el riesgo de contaminación microbiana en el momento de la fermentación, la necesidad de conocer los niveles de HUFAs y aminoácidos esenciales (Radhakrishnan et al., 2020) que aportan, así como de la cantidad de vitamina B12, importante para el cultivo de los cladóceros, así como la producción de probióticos realizados por la biomasa bacteriana (Rombaut et al., 1999; Hamre et al., 2008).

Con lo anterior, es importante el conocer la forma de combinar las diferentes fuentes de carbono a utilizar como fermentos para la producción de una biomasa bacteriana adecuada que permita mantener los requerimientos nutricionales que las

poblaciones de cladóceros necesitan, en este caso el de la *D. magna*. El manejo adecuado de estos productos agrícolas permitirá la producción continua de biomasa de este cladóceros importante para la larvicultura y alevinaje de crustáceos y peces, reduciendo el costo de producción sin perder la calidad nutricional necesaria para el bienestar de aquellas especies que las consuman.

REFERENCIAS

Abo-Taleb HA., Ashour M., Elokaby MA., Mabrouk MM., El-Feky MM., Abdelzaher OF., Gaber A., Alsanie WF. Mansour AT. (2021). Effect of a new feed *Daphnia magna* (Straus, 1820), as a fish meal substitute on growth, feed utilization, histological status, and economic revenue of grey mullet, *Mugil cephalus* (Linnaeus 1758). Sustainability, 13(13), 7093.

Abo-Taleb HA., Ashour M., Elokaby MA., Mabrouk MM., El-Feky MM., Abdelzaher OF., Gaber A., Alsanie WF. Mansour AT. (2021). Effect of a new feed *Daphnia magna* (Straus, 1820), as a fish meal substitute on growth, feed utilization, histological status, and economic revenue of grey mullet, *Mugil cephalus* (Linnaeus 1758). Sustainability, 13(13), 7093.

Ashour M., Abo-Taleb HA., Hassan AKM., et al. (2021). Valorization use of amphipod meal substitute on growth performance, feed utilization, histological and histometric indices of the gut, and economic revenue of grey mullet. Journal of Marine Science and Engineering, 9(12), 1336.

Ashour M., Abo-Taleb HA., Hassan AKM., et al. (2021). Valorization use of amphipod meal substitute on growth performance, feed utilization, histological and histometric indices of the gut, and economic revenue of grey mullet. Journal of Marine Science and Engineering, 9(12), 1336.

Becker W. (2004). Microalgae for aquaculture. The nutritional value of microalgae for aquaculture. En: A. Richmond (Ed.), Handbook of Microalgal Culture. Biotechnology and Applied Phycology (pp. 380-391). Blackwell Science, Ames, IA, USA.

Bezerra GS., Fava AF., Baumgartner G. Sebastien NY. (2021). Dietary supplementation of cattle manure in *Scenedesmus acuminatus* algae suspension in *Daphnia magna* farming. Research, Society and Development, 10(8), e37510817443.

Bezerra GS., Fava AF., Baumgartner G., Sebastien NY. (2021). Dietary supplementation of cattle manure in *Scenedesmus acuminatus* algae suspension in *Daphnia magna* farming. Research, Society and Development, 10(8), e37510817443.

Brett M. Müller-Navarra D. (1997). The role of highly unsaturated fatty acids in aquatic foodweb processes. Freshwater Biology, 38(3), 483-499.

Cahu C., Infante JZ. (2001). Substitution of live food by formulated diets in marine fish larvae. Aquaculture, 200(1-2), 161-180.

Cheban L., Grynko O. Marchenko M. (2017). Nutritional value of *Daphnia magna* (Straus, 1820) under conditions of co-cultivation with fodder microalgae. Bioloichni Systemy, 9(2), 166-170.

Conceição LEC., Yúfera M., Makridis P., Morais S., Dinis MT. (2010). Live feeds for early stages of fish rearing. Aquaculture Research, 41(5), 613-640.

Eryalçin KM., Zeybek YG. (2025). Effect of microalgal based diets on growth, proximate, fatty acid and amino acid composition of water flea (*Daphnia magna*). Aquaculture Research, 2025, 9955712.

- Eryalçin KM., Zeybek YG. (2025). Effect of microalgal based diets on growth, proximate, fatty acid and amino acid composition of water flea (*Daphnia magna*). *Aquaculture Research*, 2025, 9955712.
- Fink P., Pflitsch C. Marin K. (2011). Dietary essential amino acids affect the reproduction of the keystone herbivore *Daphnia pulex*. *PLoS ONE*, 6(12), e28498.
- Fink P., Pflitsch C., Marin K. (2011). Dietary essential amino acids affect the reproduction of the keystone herbivore *Daphnia pulex*. *PLoS ONE*, 6(12), e28498.
- Hamre K., Mollan TA., Sæle, O. Erstad B. (2008). Rotifers enriched with iodine and selenium increase survival in Atlantic cod (*Gadus morhua*) larvae. *Aquaculture*, 284(1-4), 190-195.
- Herawati VE., Hutabarat JP. Radjasa OK. (2015). Growth and survival rate of tilapia (*Oreochromis niloticus*) larvae fed by *Daphnia magna* cultured with organic fertilizer resulted from probiotic bacteria fermentation. *Hayati Journal of Biosciences*, 22(4), 159-173.
- Herawati VE., Hutabarat JP., Radjasa OK. (2015). Growth and survival rate of tilapia (*Oreochromis niloticus*) larvae fed by *Daphnia magna* cultured with organic fertilizer resulted from probiotic bacteria fermentation. *Hayati Journal of Biosciences*, 22(4), 159-173.
- Khan MA., Hasan MM., Sumon KA. Rashid H. (2020). Culture of freshwater zooplankton *Daphnia magna* fed with different feed combination. *Bangladesh Journal of Fisheries*, 32(1), 55-59.
- Khan MA., Hasan MM., Sumon KA. Rashid H. (2020). Culture of freshwater zooplankton *Daphnia magna* fed with different feed combination. *Bangladesh Journal of Fisheries*, 32(1), 55-59.
- Kilham SS., Kreeger DA., Goulden CE., Lynn SG. (1997). Effects of algal food quality on fecundity and population growth rates of *Daphnia*. *Freshwater Biology*, 38, 639-647.
- Koch U., Martin-Creuzburg D., Grossart HP. Straile D. (2011). Single dietary amino acids control resting egg production and affect population growth of a key freshwater herbivore. *Oecologia*, 167, 981-989.
- Koch U., Martin-Creuzburg D., Grossart HP. Straile D. (2012). Differences in the amino acid content of four green algae and their impact on the reproductive mode of *Daphnia pulex*. *Fundamental and Applied Limnology*, 181(4), 327-336.
- Kolkovski S. (2001). Digestive enzymes in fish larvae and juveniles – implications and applications to formulated diets. *Aquaculture*, 200(1-2), 181-201.
- Lampert W., Brendelberger H. (1996). Strategies of phenotypic low food adaptation in *Daphnia*: filter screens mesh sizes, and appendage beat rates. *Limnology and Oceanography*, 41, 216-223.
- Lari E., Steinkey D., Steinkey RJ., Pyle GG. (2018). *Daphnia magna* increase feeding activity in the presence of four amino acids. *Journal of Plankton Research*, 40(5), 537-543.
- Lazo JP., Dinis MT., Holt GJ., Faulk C., Arnold CR. (2000). Co-feeding microparticulate diets with algae: towards eliminating the need of zooplankton at first feeding in red drum (*Sciaenops ocellatus*). *Aquaculture*, 188(3-4), 339-351.
- Macedo CF., Pinto-Coelho RM. (2001). Nutritional status response of *Daphnia laevis* and *Moina micrura* from a tropical reservoir to different algal diets: *Scenedesmus quadricauda* and *Ankistrodesmus gracilis*. *Brazilian Journal of Biology*, 61, 555-562.
- Magouz FZ., Essa MA., Matter M., Mansour AT., Gaber A. Ashour M. (2021). Effect of different salinity levels on population dynamics and growth of the cyclopoid copepod *Oithona nana*. *Diversity*, 13(5), 190.

Martin-Creuzburg D., Wacker A. Basena T. (2010). Interactions between limiting nutrients: consequences for somatic and population growth of *Daphnia*. *Limnology and Oceanography*, 55(6), 2597-2607.

Radhakrishnan DK., AkbarAli I., Schmidt BV., John EM., Sivanpillai S., Thazhakot VS. (2020). Improvement of nutritional quality of live feed for aquaculture: An overview. *Aquaculture Research*, 51(1), 1-17.

Rombaut G., Dhert P., Vandenberghe J., Verschuer L., Sorgeloos P., Verstraete W. (1999). Selection of bacteria enhancing the growth rate of axenically hatched rotifers (*Brachionus plicatilis*). *Aquaculture*, 176(3-4), 195-207.

Turcihan G., İşinibilir M., Zeybek YG., Eryalçin KM. (2022). Effect of different feeds on reproduction performance, nutritional components and fatty acid composition of cladoceran water flea (*Daphnia magna*). *Aquaculture Research*, 53(6), 2420-2430.

Wacker A. Martin-Creuzburg D. (2007). Allocation of essential lipids in *Daphnia magna* during exposure to poor food. *Functional Ecology*, 21(4), 738-747.

Zeybek YG., Sayar M. Eryalcin KM. (2023). Effect of microalgal based diets on growth, proximate, fatty acid and amino acid composition of water flea (*Daphnia magna*). Preprint, Research Square (doi: 10.21203/rs.3.rs-3198694/v1).

CAPÍTULO 14

COMPARACIÓN DEL CRECIMIENTO DE *Oreochromis niloticus* EN UN BIOFLOC INCORPORANDO LA BACTERIA *Burkholderia cepacia* Y CUATRO FUENTES DE CARBONO

Data de submissão: 01/06/2026

Data de aceite: 16/06/2026

Germán Castro Mejía

División de Ciencias Biológicas y de la Salud¹
Universidad Autónoma Metropolitana
Unidad Xochimilco
Ciudad de México, CDMX, México
<https://orcid.org/0000-0003-3007-1005>

Jorge Castro Mejía

División de Ciencias Biológicas y de la Salud¹
Universidad Autónoma Metropolitana
Unidad Xochimilco
Ciudad de México, CDMX, México
<https://orcid.org/0000-0002-5632-2581>

Andrés Elías Castro Castellón

División de Ciencias Biológicas y de la Salud¹
Universidad Autónoma Metropolitana
Unidad Xochimilco
Ciudad de México, CDMX, México
<https://orcid.org/0000-0001-7696-2597>

Arnulfo Misael Martínez Meingüer

División de Ciencias Biológicas y de la Salud¹
Universidad Autónoma Metropolitana
Unidad Xochimilco
Ciudad de México, CDMX, México
<https://orcid.org/0000-0002-6255-4901>

María del Carmen Monroy Dosta

División de Ciencias Biológicas y de la Salud¹
Universidad Autónoma Metropolitana
Unidad Xochimilco
Ciudad de México, CDMX, México
<https://orcid.org/0000-0002-1856-0511>

José Antonio Mata Sotres

División de Ciencias Biológicas y de la Salud¹
Universidad Autónoma Metropolitana
Unidad Xochimilco
Ciudad de México, CDMX, México
<https://orcid.org/0000-0001-5817-3025>

José Alberto Ramírez Torrez

División de Ciencias Biológicas y de la Salud¹
Universidad Autónoma Metropolitana
Unidad Xochimilco
Ciudad de México, CDMX, México
<https://orcid.org/0000-0002-3321-6604>

RESUMEN: El presente estudio evaluó el crecimiento en talla y peso de *Oreochromis niloticus* cultivada en un sistema BFT inoculado con la bacteria *Burkholderia cepacia* y cuatro fuentes de carbono vegetal: harina de mezquite, harina de hojas de almendro, café y moringa. El experimento tuvo una duración de 120 días. Se sembraron 20 organismos por tratamiento con peso inicial promedio de 9.31 ± 1.12 g y longitud total de 6.12 ± 0.66 cm. La relación carbono:nitrógeno se mantuvo en 15:1, y el alimento balanceado se suministró

¹Depto. El Hombre y su Ambiente, Laboratorio de Producción de Alimento Vivo y Biofloc. Cal. del Hueso No.1100. Alcaldía Coyoacán. CP. 04960. Ciudad de México, México.

al 6% de la biomasa total. Cada 15 días se registraron medidas biométricas (longitud, ancho, peso) y parámetros químicos del agua (amonio, nitritos, nitratos y fosfatos). Se determinaron la ganancia de peso y talla, así como sus TCA y TIC, su KM, FCA y ECA. Los resultados mostraron que la moringa promovió la mayor longitud final (21.71 ± 0.63 cm) y la mayor ganancia en longitud (15.61 cm), mientras que el mezquite destacó en ancho final (9.99 ± 0.10 cm). El café produjo el mayor peso final (358.61 ± 3.14 g) y la tasa de crecimiento absoluto en peso más alta (2.893 g día⁻¹). Mientras que el café presentó los menores incrementos diarios en longitud y ancho. La supervivencia fue superior al 90% en todos los tratamientos. El factor de conversión alimenticia osciló entre 0.182 y 0.183, sin diferencias significativas entre tratamientos. El factor de condición mostró una tendencia positiva en todos los casos, indicando una adecuada relación longitud-peso. En cuanto a la calidad del agua, el tratamiento con almendro mantuvo los niveles más bajos de amonio y nitratos dentro de los rangos óptimos. La selección de la fuente de carbono puede orientarse según el objetivo de producción.

PALABRAS CLAVE: *Oreochromis niloticus*; *Burkholderia cepacia*; Biofloc.

GROWTH COMPARISON OF OREOCHROMIS NILOTICUS IN A BIOFLOC SYSTEM INCORPORATING BURKHOLDERIA CEPACIA AND FOUR CARBON SOURCES

ABSTRACT: This study evaluated the growth in length and weight of *Oreochromis niloticus* cultured in a BFT system inoculated with the bacterium *Burkholderia cepacia* and four plant-based carbon sources: mesquite flour, almond leaf flour, coffee, and moringa. The experiment lasted 120 days. Twenty organisms were stocked per treatment, with an average initial weight of 9.31 ± 1.12 g and a total length of 6.12 ± 0.66 cm. The carbon:nitrogen ratio was maintained at 15:1, and balanced feed was supplied at 6% of the total biomass. Every 15 days, biometric measurements (length, width, and weight) and water chemical parameters (ammonium, nitrites, nitrates, and phosphates) were recorded. Weight and length gain were determined, as well as their absolute growth rate and relative growth rate, condition factor, feed conversion ratio, and feed efficiency. The results showed that moringa promoted the greatest final length (21.71 ± 0.63 cm) and the greatest length gain (15.61 cm), while mesquite stood out for final width (9.99 ± 0.10 cm). Coffee produced the highest final weight (358.61 ± 3.14 g) and the highest absolute growth rate in weight (2.893 g day⁻¹). However, coffee showed the lowest daily increases in length and width. Survival was above 90% in all treatments. The feed conversion ratio ranged from 0.182 to 0.183, with no significant differences among treatments. The condition factor showed a positive trend in all cases, indicating an adequate length-weight relationship. Regarding water quality, the almond leaf treatment maintained the lowest ammonium and nitrate levels within optimal ranges. The selection of the carbon source may be guided by the production objective.

KEYWORDS: *Oreochromis niloticus*; *Burkholderia cepacia*; Biofloc.

1. INTRODUCCIÓN

El sistema Biofloc (BFT) mantiene las condiciones y la calidad de agua con respecto a la fijación y control del nitrógeno inorgánico tóxico, llamada amoníaco (NH_3) y el nitrito (NO_2^-); por otro lado, el BFT genera proteína microbiana que puede ser aprovechada para

la alimentación de las especies acuáticas en cultivo y así reducir las tasas de conversión alimenticia [Azim et al. 2008, Kubitzka 2011, Craig et al. 2012, Monroy et al. 2013, Castro et al. 2018, Hernández et al. 2019).

Teniendo en cuenta lo anterior el uso y cultivo de los flóculos microbianos a partir de una alta relación de C:N en el agua, ha sido empleado para acuicultura como un sistema alternativo super-intensivo de producción, el nitrógeno proviene del alimento no consumido y de la excreción propia de la especie de cultivo y el carbono de la adición de una fuente externa de carbohidratos, con poco o nulo recambio de agua y una alta oxigenación (Avnimelech 2012, Emerenciano et al. 2012, Emerenciano et al. 2013, Craig et al. 2012, Kubitzka 2011).

Las bacterias se alimentan con sustrato orgánico que contiene principalmente carbono y nulo o poco nitrógeno, este último lo toman del agua con el fin de producir la proteína necesaria para el crecimiento y la multiplicación celular (Avnimelech 2012a, Collazos y Arias 2015); las bacterias y otros microorganismos usan carbohidratos (azúcar, almidón y celulosa) como alimento, para la generación de energía y crecimiento. En consecuencia, para que las comunidades bacterianas autótrofas y/o heterótrofas prosperen debe haber disponibilidad del carbono inorgánico y orgánico, sin embargo, para el caso de las bacterias heterótrofas, Ebeling et al. (2006), sugieren que no todo el carbono orgánico en la alimentación es fácilmente disponible para las bacterias, por lo que se hace necesario el probar diferentes fuentes vegetales de carbono para observar el crecimiento y desarrollo de las comunidades del Biofloc. En el laboratorio de Alimento Vivo de la Universidad Autónoma Metropolitana de Xochimilco se han probado varias fuentes de carbono de origen vegetal como moringa (Castro-Castellón et al. 2020a, Castro et al. 2020, Castro et al. 2023 a, b, c, d), harina de zanahoria y de betabel (Castro-Castellón et al. 2023a), desechos de café, harina de macroalga, harina de Yuca (Castro-Castellón et al. 2020b).

Este estudio se pretende evaluar el desarrollo del sistema Biofloc utilizando otras fuentes de carbono vegetal como es la harina mezquite y la harina de las hojas de almendro, además de utilizar el café y la moringa como harina, para determinar el crecimiento en talla y peso de *Oreochromis niloticus*.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. ORGANISMOS DE PRUEBA

Se utilizaron organismos tilapia de la especie *Oreochromis niloticus* con un promedio de longitud total de 6.12 ± 0.66 cm, un ancho de 1.65 ± 0.23 cm y un peso de 9.31 ± 1.12 g.

2.2. PREPARACIÓN DE *BURKHOLDERIA CEPACIA*

Del agua del estanque cultivo al exterior, se tomaron 1 L de agua el cual fue tamizado por una luz de malla de 5.0 μm . Se tomaron 10 muestras que se sembraron en Cajas de Petri con un medio de cultivo Infusión de Cerebro/Corazón (TSA) marca BDBioxon® para hacer crecer a las diferentes cepas bacterianas. Una vez obtenido su cultivo, se seleccionó la bacteria más abundante y se le realizó una prueba API para determinar el género y la especie. Seleccionada la cepa bacteriana, se colocaron 200 mL en 1 L de Caldo de Soya Trypticaseína marca BDBioxon® para su proliferación y se agregaron 300 mL por tanque experimental de 160 L, para posteriormente, agregar la fuente de carbono (0.5 g cada tercer día).

2.3. FUENTES DE CARBONO EMPLEADAS

Se utilizaron cuatro fuentes de carbono: a) Mezquite, b) Café, c) Moringa, y d) Almendro. Todos ellos deshidratados a 40°C y pulverizados. Fueron colocados en una proporción para mantener una relación carbono/nitrógeno 1:15, acorde a la fórmula de Emerenciano *et al.*, (2011). La concentración utilizada fue del 0.1% del peso total de la población introducida.

2.4. ELABORACIÓN DE LA DIETA SUMINISTRADO

La dieta fue elaborada en el propio laboratorio en forma de pellets deshidratados. Para ello, se utilizaron 7 g de harina de zanahoria, 7 g de harina de betabel, una lata de atún de 140 g, 56 g de harina de trigo, dos cápsulas de un multivitamínico rico en vitamina E. y 3.5 g de grenetina. La grenetina fue hidratada previamente con 50 mL de agua, para posteriormente activarla con calentamiento en un microondas durante un minuto, en tiempo de 3 a 4 segundos hasta culminar el tiempo. Todo se mezcló en una licuadora y la masa resultante se hizo pasar por un molino para obtener los pellets de 2 a 3 mm de ancho. Los cuales se colocaron en un deshidratador a 40°C durante 24 horas para extraer el máximo de humedad y así poder conservarlos en un lugar fresco.

El alimento fue suministrado a las tilapias en una proporción del 6% del peso total de la población introducida en cada uno de los estanques durante todo el experimento. Cada 15 días se obtuvo el dato del peso para hacer los cambios en la cantidad de alimento, no en la proporción.

2.5. DISEÑO EXPERIMENTAL

Se utilizaron tinas de 250 L de capacidad, con 200 L de agua, a la cual se le instaló un sistema de aireación. La temperatura se mantuvo controlada en $23\pm 2^{\circ}\text{C}$, con un sistema automático de luz 12:12 horas. Previo a la introducción de las tilapias se le agregaron 200 mL del cultivo de bacteria *Burkholderia cepacia* con una primera dosis de fuente de carbono de 0.5 g, para posteriormente colocar la que corresponde acorde a la biomasa total introducida de organismos.

Se colocaron 20 organismos por cada tratamiento experimental y cada 15 días fueron tomadas las medidas biométricas de longitud total (cm), ancho (cm) y peso (g). Así mismo, se tomaron los parámetros químicos del sistema de cultivo: Amonio (NH_4), Nitratos (NO_3), Nitritos (NO_2) y Fosfatos (P_2O_4). El experimento tuvo una duración de 120 días.

2.6. PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

Todos los valores biométricos de los organismos y parámetros químicos del agua de cultivo se introdujeron a una base de datos en Excel 2019 para obtener su estadística descriptiva y las curvas de crecimiento de la longitud total, ancho, y peso con sus respectivas fórmulas.

Se obtuvo la ganancia en longitud total, ancho y peso de los organismos por tratamiento utilizando la fórmula:

$$\text{Ganancia} = \text{Valor final} - \text{Valor inicial}$$

Se obtuvo la tasa de crecimiento absoluto de la longitud total, ancho, y peso de los organismos utilizando la fórmula:

$$\text{TCA} = \frac{\text{Valor final} - \text{Valor inicial}}{\text{Tiempo considerado}}$$

Se obtuvo la tasa de crecimiento instantáneo de la longitud total, ancho, y peso de los organismos utilizando la fórmula:

$$\text{TCA} = \frac{\text{LN Valor final} - \text{LN Valor inicial}}{\text{Tiempo considerado}} \times 100$$

Donde LN = Logaritmo natural

El Factor de condición (KM) se obtuvo utilizando la siguiente fórmula:

$$KM = \text{Longitud} * \text{Peso} * \text{CCV}$$

Donde:

CCV = Coeficiente de correlación de la variable longitud/peso

El factor de conversión alimenticia (FCA) se obtuvo utilizando la siguiente fórmula:

$$FCA = \frac{\text{Biomasa final obtenida por los organismos}}{\text{Cantidad total de alimento suministrado}}$$

La eficiencia de conversión alimenticia (ECA) se obtuvo utilizando la siguiente fórmula:

$$ECA = \frac{1}{FCA} \times 100$$

2.7. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

La longitud total, el ancho y el peso de los organismos fueron colocados en un programa estadístico SYSTAT® 2013 para realizar un análisis de varianza de una sola vía, para determinar diferencias estadísticas significativas ($P < 0.05$). Dando un resultado positivo a ello, se introdujo al proceso de comparación de medias múltiples para determinar entre que tratamientos existían las diferencias significativas ($P < 0.05$).

3. RESULTADOS

En la Tabla 1 se muestran los valores promedio de las principales medidas biométricas.

Tabla 1. Valores promedio de las variables biométricas principales y alimenticias de los organismos en los cuatro tratamientos experimentales.

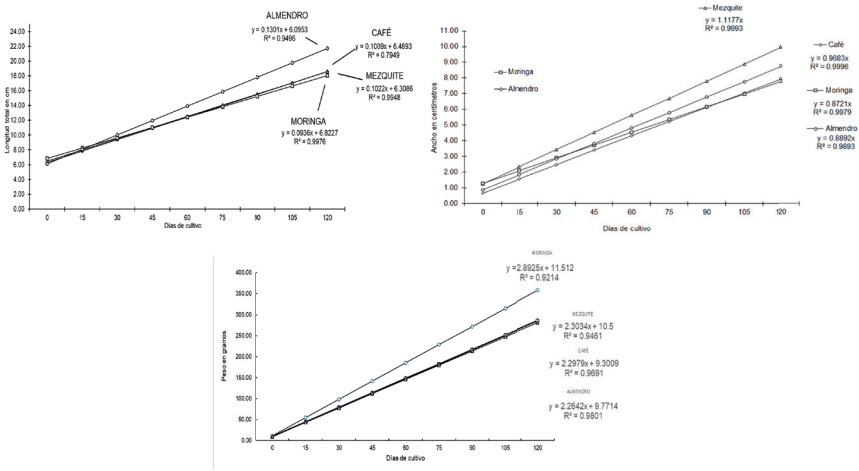
Variable biométrica y alimenticia	Mezquite	Almendra	Café	Moringa
Long inicial	6.31±0.29	6.47±0.34	6.82±0.57	6.10±0.34
Longitud final	18.57±0.51	18.58±0.45	18.05±0.59	21.71±0.63
Ancho inicial	1.25±0.07	0.68±0.06	1.29±0.12	0.88±0.09
Ancho final	9.99±0.10	7.95±0.15	7.80±0.14	8.76±0.16
Peso inicial	10.50±1.06	9.30±0.96	11.51±2.02	9.77±1.55
Peso final	286.91±3.20	285.05±3.18	358.61±3.14	281.48±4.61

Variable biométrica y alimenticia	Mezquite	Almendra	Café	Moringa
Ganancia longitud (cm)	12.26	12.11	11.23	15.61
Ganancia ancho (cm)	8.74	7.27	6.52	7.88
Ganancia peso (g)	276.41	275.75	347.10	271.70
Supervivencia (%)	91	92	90	93
TCA longitud (cm día ⁻¹)	0.102	0.101	0.094	0.130
TCA ancho (cm día ⁻¹)	0.073	0.061	0.054	0.066
TCA peso (g día ⁻¹)	2.303	2.298	2.893	2.264
TIC longitud (% incremento día ⁻¹)	0.900	0.879	0.811	1.058
TIC ancho (% incremento día ⁻¹)	1.729	2.055	1.501	1.918
TIC peso (% incremento día ⁻¹)	2.303	2.298	2.893	2.264
Eficiencia de conversión alimenticia (ECA) (%)	545.75	548.42	548.78	547.01
Factor de conversión alimenticia (FCA)	0.183	0.182	0.182	0.183

En cuanto a la longitud final obtenida por los organismos en los cuatro tratamientos se observa que el tratamiento de Moringa presenta el valor más alto con 21.71 ± 0.63 cm, más de tres centímetros que los otros organismos que estuvieron en el intervalo de 18.05 ± 0.59 hasta 18.57 ± 0.51 cm. Obteniendo un valor de significancia ($P < 0.05$) con respecto a los organismos en Moringa. Sin embargo, en lo que respecta a la variable ancho son los organismos del tratamiento de Mezquite los que presentan el valor más alto con 9.99 ± 0.10 cm, mientras que los tratamientos de Almendra y Café presentaron un intervalo entre los 7.80 ± 0.10 hasta 7.95 ± 0.15 cm no encontrando diferencias significativas ($P < 0.05$) entre los mismos. Mientras que los tratamientos Mezquite y Moringa presentan diferencias significativas ($P < 0.05$) entre ellos y los demás tratamientos. En cuanto a la variable de peso de los organismos, el valor más alto se obtuvo en el tratamiento de Café con 358.61 ± 3.14 g, siendo este valor significativamente diferente ($P < 0.05$) con los demás tratamientos. Los otros tres tratamientos se encontraron en un intervalo de 281.48 ± 4.61 hasta 286.91 ± 3.20 g, sin presentar diferencias significativas ($P > 0.05$) entre ellos.

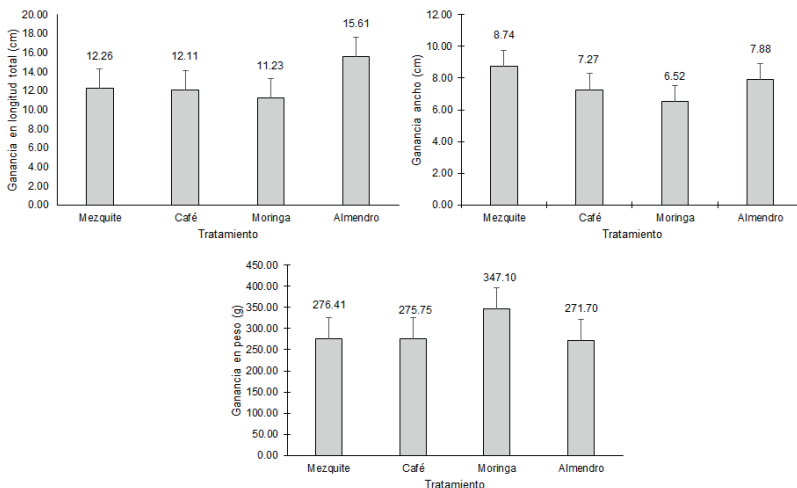
Sus curvas de crecimiento se presentan en la Fig.1 con sus respectivas fórmulas.

Fig.1.- Curvas de crecimiento de la longitud, ancho y peso de los organismos cultivados en los cuatro tratamientos experimentales.



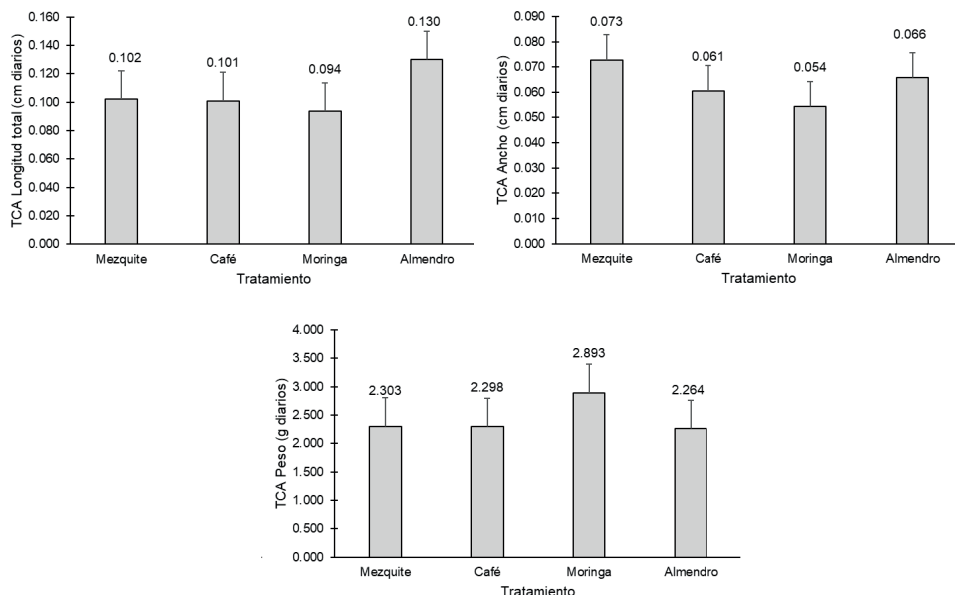
En la Fig.2 se muestran los valores promedio de la ganancia de longitud total, ancho y peso de los organismos en los tratamientos experimentales. Se puede observar que el tratamiento de Almendro obtuvo la mayor ganancia con 15.61 cm siendo significativamente diferente ($P < 0.05$) con los otros tres tratamientos cuya ganancia fluctuó entre 11.23 y 12.26 cm los cuales no presenta una diferencia significativa ($P > 0.05$). En cambio, en cuanto a la ganancia del ancho el valor más alto se presentó en el tratamiento de Mezquite con 8.74 cm y el valor más bajo en el tratamiento de Moringa con 6.52 cm. Mezquite presentó diferencias significativas ($P < 0.05$) con los demás tratamientos, no así los otros tratamientos entre sí.

Fig.2.- Valores promedio de la ganancia en longitud total, ancho y peso de los organismos en cultivo en los diferentes tratamientos experimentales.



En la Fig. 3 se muestran los valores promedio de la tasa de crecimiento absoluto (TCA) de la longitud total, ancho y peso de los organismos en los tratamientos. El valor más alto de TCA en longitud se observó en el tratamiento de Moringa con $0.130 \text{ cm día}^{-1}$, siendo el valor más bajo en el tratamiento con Café con $0.094 \text{ cm día}^{-1}$. Los tratamientos de Mezquite y Almendro no presentan diferencias significativas ($P > 0.05$), no así los tratamientos de Café y Moringa con respecto a los demás ($P < 0.05$). En cuanto a la variable ancho la TCA más alta se presentó en el tratamiento de Mezquite (0.073 cm) y la menor en el tratamiento con Café (0.054 cm). Los tratamientos de Almendro y Moringa no presentan diferencias significativas ($P < 0.05$), a diferencia de los tratamientos Mezquite y Café que no lo presentan ($P > 0.05$). La TCA del peso es muy semejante entre todos los tratamientos sin encontrar diferencias significativas ($P > 0.05$) a diferencia del tratamiento Café que tiene el valor más alto con 2.893 g día^{-1} , el cual si presenta diferencias significativas ($P < 0.05$) con los demás.

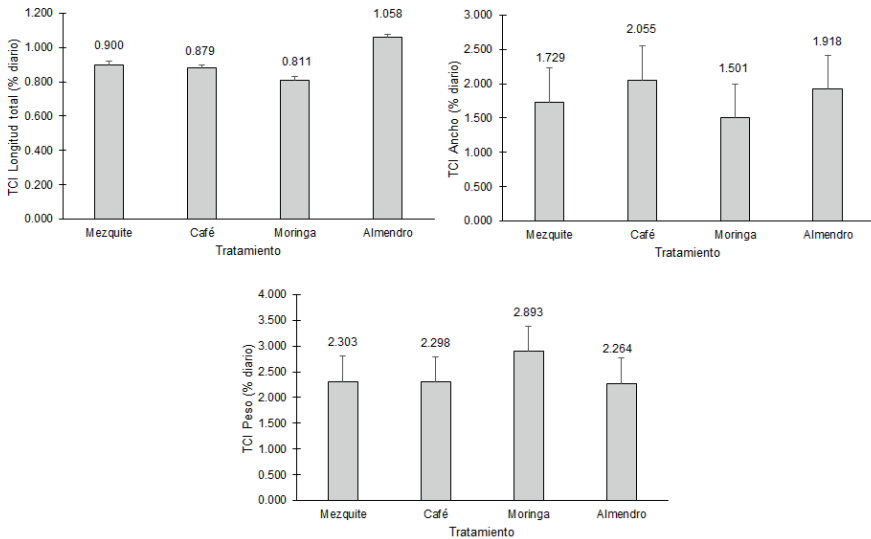
Fig.3.- Valores promedio de la tasa de crecimiento absoluto de la longitud total, ancho y peso de los organismos en cultivo en los diferentes tratamientos experimentales.



En la Fig. 4 se presentan los valores promedio de incremento diario (%) de la longitud total, ancho y peso de la TIC de los organismos. El mayor incremento se observa en los organismos en el tratamiento de Moringa con $1.058\% \text{ día}^{-1}$, mientras que el valor más bajo está en el tratamiento de Café con $0.811\% \text{ día}^{-1}$. Ambos tratamientos presentan diferencias significativas con los otros tratamientos ($P < 0.05$). Los otros dos tratamientos

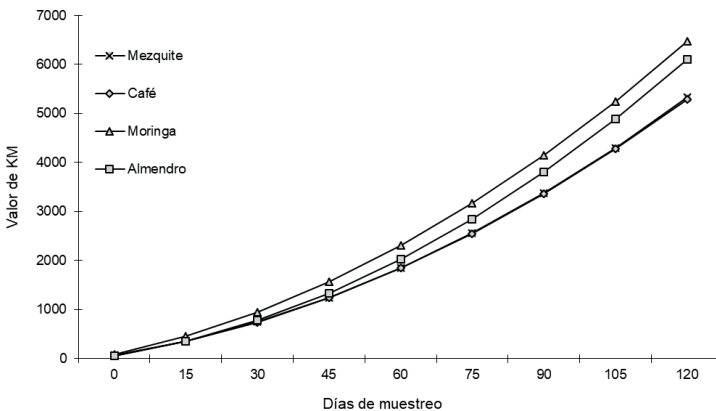
(Mezquite y Almendro), no presentan diferencias significativas entre ellas ($P>0.05$). En cuanto al incremento del ancho, el valor más alto esta en el tratamiento de Moringa con 2.055 % día⁻¹ y el valor más bajo fue para el tratamiento de Café con 1.501% día⁻¹. En esta variable todos los tratamientos presentan diferencias significativas ($P<0.05$) entre ellos.

En la Fig. 4. Valores promedio de la TIC (% día⁻¹) se muestran los valores en porcentaje de incremento diario a la longitud total, ancho y peso de la tasa instantánea de crecimiento (TIC).



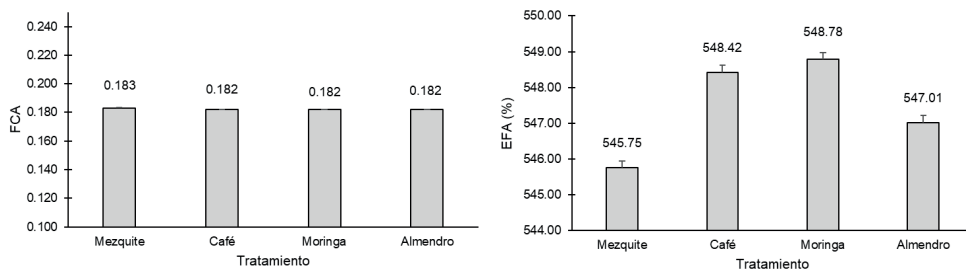
En la Fig. 5 se muestra la curva del grado de bienestar de los organismos en los diferentes tratamientos (KM). Como se puede observar, todas las curvas presentan una curva con tendencia positiva, por lo que se puede decir que no pierden su relación longitud/peso.

En la Fig. 5. Curvas del grado de bienestar (KM) de los organismos (relación longitud/peso) de los organismos en los diferentes tratamientos experimentales.



En la Fig. 6 se presentan los valores finales de la eficiencia de conversión alimenticia (ECA) y conversión alimenticia (FCA) que obtuvieron los organismos en los cuatro tratamientos experimentales.

En la Fig. 6. Valores promedio del factor de conversión alimenticia (FCA) y de la eficiencia de conversión alimenticia (ECA) de los organismos en los cuatro tratamientos experimentales.



Como se puede observar en estas dos variables (FCA y ECA), no presentan diferencias significativas entre ellas ($P > 0.05$) ya que en el caso de FCA la diferencia es tan solo de 0.001 de relación entre los tratamientos y con respecto al ECA, la diferencia tan solo es del 2%.

4. DISCUSIÓN

Los valores de pH en todos los tratamientos se mantuvieron en un rango básico (mayor a 7.5), lo cual concuerda con lo establecido por Emerenciano et al.[9] quien indica que en sistemas de Biofloc el pH debe mantenerse en un rango de 7 a 8.5 para un óptimo desempeño. En el caso del amonio (NH_4^+), el tratamientos con almendro presentó niveles bajos de amonio, cumpliendo con lo recomendado por Rakocy[10] de mantener concentraciones menores a 2.0 mg/L, por otro lado los tratamientos de café, mezquite y moringa superan los rangos determinados anteriormente.

Es importante mantener los niveles de amonio dentro de los rangos adecuados, ya que concentraciones altas pueden ser tóxicas para los organismos acuáticos y afectar negativamente la calidad del agua.

Los niveles de Nitrito (NO_2^-) en todos los tratamientos, fueron altos, excediendo los valores máximos de 5 mg/L recomendados por Rakocy[10] y Alcántar et al.[11] Estos niveles pueden ser perjudiciales para los organismos cultivados, ya que altas concentraciones de nitrito son tóxicas e inhibe el crecimiento. En el caso de Nitrato (NO_3^-) los niveles en el tratamiento con almendro se mantuvieron dentro del rango óptimo de 0.5 a 20 mg/L sugerido por Emerenciano et al.[9] Sin embargo, en los tratamientos con

café, mezquite y moringa, las concentraciones de nitrato fueron elevadas, superando este rango.

Los resultados reportados por Bustillo-Lecompte et al.[12] evaluaron un sistema acuapónico para el cultivo de tilapia y observaron niveles de nitrito inferiores a 1 mg/L, niveles de amonio por debajo de 0.5 mg/L y niveles de nitrato entre 50 y 100 mg/L. Estos valores se encontraban dentro de los rangos recomendados para el cultivo de tilapia.

De manera similar, Martins et al.[13] estudiaron un sistema acuapónico de tilapia y hortalizas, reportando niveles de nitrito inferiores a 0.5 mg/L, niveles de amonio por debajo de 1 mg/L y niveles de nitrato entre 5 y 20 mg/L, los cuales se consideran adecuados para el cultivo de tilapia.

En el tratamiento con almendro como fuente de carbono, las concentraciones de PO₄-3- oscilaron entre 3.4 y 7.9 mg/L. Estos valores se encuentran dentro del rango reportado por Souza et al.[14] quienes evaluaron un sistema Biofloc para el cultivo de tilapia y obtuvieron concentraciones de PO₄-3- entre 2.5 y 8.0 mg/L. Los autores sugieren que estos niveles son aceptables para el crecimiento óptimo de la tilapia.

En el tratamiento con moringa como fuente de carbono, se registraron las concentraciones más altas de PO₄-3-, con un rango de 4.5 a 30 mg/L. Estos valores son considerablemente superiores a los reportados por la mayoría de las investigaciones consultadas. Por ejemplo, Souza et al.[14] obtuvieron concentraciones de PO₄-3- entre 2.0 y 12.0 mg/L en un sistema Biofloc para tilapia, y sugieren que niveles superiores a 15 mg/L podrían ser perjudiciales para el cultivo.

Es importante mencionar que, a pesar de los recambios de agua realizados, los niveles de compuestos nitrogenados en los tratamientos con mezquite y moringa no pudieron ser controlados adecuadamente, sugiriendo que estas fuentes de carbono podrían estar contribuyendo a un exceso de nutrientes en el sistema, dificultando el mantenimiento de las condiciones óptimas.

Los resultados del crecimiento de *Solanum lycopersicum* cerasiforme con almendro promovió la mayor producción de hojas en las plantas de tomate, lo cual es consistente con los hallazgos de Somerville et al.[15] quienes reportaron un aumento en el número de hojas en plantas de tomate cultivadas en un sistema acuapónico con almendro como fuente de carbono, sugiriendo que los compuestos fenólicos presentes en el almendro podrían contribuir a este efecto.

En cuanto al crecimiento en altura de las plantas, el tratamiento con moringa promovió el mayor desarrollo, alcanzando una longitud promedio de 65.55 cm. Estos resultados son similares a los obtenidos por Delgado et al.[16] quienes evaluaron el

crecimiento de tomates en un sistema acuapónico Biofloc con diferentes fuentes de carbono orgánico. En su estudio, las plantas cultivadas con moringa exhibieron una altura significativamente mayor en comparación con otros tratamientos, con una longitud promedio de 72.3 cm.

Sin embargo, los resultados de la presente investigación contrastan con lo obtenido por Martínez-Espinoza et al.[17] quienes realizaron una investigación en la que cultivaron plantas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) en un sistema acuapónico utilizando vainas de mezquite (*Prosopis laevigata*) y lana de roca como sustratos, observaron un mejor crecimiento en longitud y número de hojas en plantas de tomate cultivadas en un sistema acuapónico con mezquite como fuente de carbono. Esta discrepancia podría deberse a diferencias en las condiciones de cultivo, las especies utilizadas o las concentraciones de los nutrientes en las diferentes fuentes de carbono.

Respecto a los resultados obtenidos sobre el crecimiento de tilapia (*Oreochromis niloticus*) en un sistema Biofloc con diferentes fuentes de carbono, se muestran que las fuentes de carbono de almendro y mezquite promovieron un mayor crecimiento en longitud, ancho y peso de las tilapias en comparación con las fuentes de moringa y café. Estos hallazgos concuerdan con los reportados por Emerenciano et al.[9] quienes evaluaron el desempeño de la tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*) en un sistema Biofloc utilizando diferentes fuentes de carbono orgánico. En su estudio, encontraron que las fuentes de carbono a base de harina de almendro y harina de semilla de mezquite proporcionaron un mejor crecimiento y mayor eficiencia en la conversión alimenticia en comparación con otras fuentes como la harina de semilla de moringa y la harina de semilla de café.

Por otra parte, el tratamiento de café fue el menos eficiente para el crecimiento de *Oreochromis niloticus*, debido a las altas concentraciones de NO_2^- , NO_3^- y NH_4^+ ya que Guzman[18] en su estudio para evaluar el crecimiento de *Oreochromis niloticus* en Biofloc utilizando café como fuente de carbono, obtuvo buenos resultados en el crecimiento de los peces, con una supervivencia mayor del 85% y con concentraciones de NO_2^- , NO_3^- y NH_4^+ bajas, lo que se puede indicar que estas concentraciones altas en este estudio, inhibieron el crecimiento y los ejemplares solo estaban sobreviviendo.

Los resultados del factor de condición (km) en la presente investigación indicaron que las tilapias cultivadas con almendro alcanzaron longitudes y pesos mayores en comparación a las cultivadas con moringa, esto concuerda con la investigación realizada por Azim y Little[19] quienes reportaron que el factor de condición es un indicador de la condición nutricional y el estado de salud de los peces cultivados en el sistema Biofloc.

REFERENCIAS

1. Hernández Mancipe LE, Londoño Vélez JI, Hernández García KA, & Torres Hernández LC. (2019). Los sistemas biofloc: una estrategia eficiente en la producción acuícola. *Rev. CES Med. Zootec.*; Vol 14 (1): 70-99. Obtenido de: <https://www.redalyc.org/journal/3214/321461742007/html/>
2. Castillo Caceres LL. (2023). Fuente de carbono en la tecnología biofloc: uso de la cáscara de papa para la producción de cachama blanca (*piaractus orinoquense*). Universidad Cooperativa de Colombia, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Bucaramanga. Obtenido de: <https://repository.ucc.edu.co/server/api/core/bitstreams/9a7a1ace-7182-445e-9086-beb52d736738/content>
3. INTAGRI. (2017). Acuaponia para la Producción de Plantas y Peces. Serie Horticultura Protegida Núm. 32. Artículos Técnicos de INTAGRI. México. 6. Obtenido de: <https://www.intagri.com/articulos/horticultura-protegida/acuaponia-produccion-de-plantas-y-peces>
4. Emerenciano M, Ballester ELC, Cavalli RO, & Wasielesky W. (2011). Effect of biofloc technology (BFT) on the early postlarval stage of pink shrimp *Farfantepenaeus panaeus*: growth performance, floc composition and salinity stress tolerance. *Aquaculture International* 19:891-901.
5. Cuerpo mente. (2018). Almendras. Almendras: propiedades, beneficios y valor nutricional. Obtenido de: cuerpomente.com
6. Luna-Almaraz AG, Martínez-Herrera RE, & Alemán-Huerta ME. (2022). El mezquite: un "superalimento" ancestral. *Revista Ciencia UANL*, 25(115), 20-29.
7. Tabla nutricional de café. (2015). Harina de café, carbohidratos (59.9 gr), proteínas (1.96 gr), fibra (0 gr). Obtenido de: <https://www.todoalimentos.org/cafe/>
8. CONASI. (2016). Moringa en polvo ecológica. Obtenido de: <https://www.conasi.eu/superalimentos/1371-moringa-en-polvo.html>
9. Emerenciano M, Martínez-Cordova LR, Martínez-Porchas M, & Miranda-Baeza A. (2017). Biofloc Technology (BFT): A Tool for Water Quality.
10. Rakocy JE. 1989. Hydroponic lettuce production in a closed recirculating system. En *Acuicultura de Aguas Calientes: Sistemas Integrados y Acuaponía* (pp. 233-245). Málaga, España: Publicaciones Universidad de Málaga.
11. Alcántar Vázquez JP, Santos Santos C, Moreno de la Torre R, Antonio Estrada C. (2014). Manual para la producción de supermachos de tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*). UNPA-PIFI, Oaxaca. México. Obtenido de: <https://www.unpa.edu.mx/libros/2-Manualproducciontilapia.pdf>
12. Bustillo-Lecompte CF, Kakaney M, Knight J, Colón BV, Mehta CM, Badalo K, & Souder T. (2016). Evaluación de un sistema acuapónico para el cultivo de tilapia. *Revista de Acuaponía Tropical*, 14(3), 25-42.
13. Martins CIM, Eding EH, Verdegem MCJ, Heinsbroek LTN, Schneider O, Blancheton JP, & Verreth JAJ. (2010). New developments in recirculating aquaculture systems in Europe: A perspective on environmental sustainability. *Aquacultural Engineering*, 43(3), 83-93.
14. Souza FB, Silva JN, Ferreira TO, Ribeiro VL, & Santos AB. (2020). Evaluación de un sistema Biofloc para el cultivo de tilapia y optimización de niveles de fósforo. *Revista Brasileña de Acuicultura*, 26(2), 144-157. Obtenido de: <https://doi.org/10.1590/rbac.v26i2.8754>

15. Somerville C, Cohen M, Pantanella E, Stankus A, & Lovatelli A. (2014). Small-scale aquaponic food production. Integrated fish and plant farming. FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper, 589.
16. Delgado MA, Rodríguez JC, & Gutiérrez J. (2019). Crecimiento y rendimiento de tomates cultivados en un sistema acuapónico biofloc con diferentes fuentes de carbono. *Acuicultura*, 515, 734553.1
17. Martínez-Espinoza C, Zavala-León MJ, Cristóbal-Alejo J, Guillén-Navarro K, & Espinoza-Velazco C. (2020). Aquaponic production of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) with mesquite (*Prosopis laevigata*) pods and rockwool as substrates. *Water*, 12(3), 843.
18. Guzman Tirado KM. (2019). Relación entre los compuestos nitrogenados y las comunidades microbianas presentes en un sistema de cultivo biofloc y su efecto en el crecimiento de *Oreochromis niloticus*. Universidad Autónoma Metropolitana, unidad Xochimilco. Obtenido de: <https://repositorio.xoc.uam.mx/jspui/bitstream/123456789/25151/1/cbs1972630.pdf>
19. Azim ME, & Little DC. (2008). The biofloc technology (BFT) in indoor tanks: water quality, biofloc composition, and growth and welfare of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Aquaculture*, 283(1-4), 29-35. Obtenido de: <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2008.06.030>

SOBRE O ORGANIZADOR

Eduardo Eugênio Spers realizou pós-doutorado na Wageningen University (WUR), Holanda, e especialização no IGIA, França. Possui doutorado em Administração pela Universidade de São Paulo (USP). Foi Professor do Programa de Mestrado e Doutorado em Administração e do Mestrado Profissional em Comportamento do Consumidor da ESPM. Líder do tema Teoria, Epistemologia e Métodos de Pesquisa em Marketing na Associação Nacional de Pós-Graduação e Pesquisa em Administração (ANPAD). Participou de diversos projetos de consultoria e pesquisa coordenados pelo PENSA e Markestrat. É Professor Titular no Departamento de Economia, Administração e Sociologia, docente do Mestrado em Administração e Coordenador do Grupo de Extensão MarkEsalq no campus da USP/Esalq. Proferiu palestras em diversos eventos acadêmicos e profissionais, com diversos artigos publicados em periódicos nacionais e internacionais, livros e capítulos de livros sobre agronegócios, com foco no marketing e no comportamento do produtor rural e do consumidor de alimentos.

ÍNDICE REMISSIVO

A

Aceites esenciales 136, 137, 140, 142, 143, 144, 150, 151, 153, 158, 160

Ácidos orgánicos 136, 137, 139, 146, 147, 148, 149, 150, 151, 153

Actitudes ambientales 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33

Actividad antimicrobiana 137, 145, 147, 148

Acuicultura 163, 164, 169, 171, 178, 192, 204

Agricultura 1, 2, 4, 6, 22, 23, 35, 45, 64, 65, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 109, 110, 131, 135

Agricultura sostenible 2, 35

Agroecología 1, 2, 4, 5, 22

Alimento vivo 162, 163, 164, 175, 190, 192

Almidón 113, 115, 116, 119, 135, 192

Antocianinas 113, 114, 115, 117, 119, 120, 122, 123, 131, 135

B

Bioestimulante 51, 64

Biofloc 162, 173, 175, 190, 191, 192, 200, 201, 202, 203, 204

Biomasa 36, 66, 134, 164, 176, 177, 178, 184, 185, 186, 187, 191, 194

Burkholderia cepacia 162, 163, 165, 166, 175, 176, 178, 190, 191, 193, 194

C

Características físicas 123, 124, 135

D

Daphnia magna 169, 171, 172, 173, 174, 175, 176, 177, 179, 184, 187, 188, 189

Daphnia pulicaria 162, 163, 169, 171

Desarrollo sustentable 25, 27, 28, 33

Difusión 97, 99, 100, 103, 104, 106, 108, 111

Dureza de grano 113

E

Educación ambiental 25, 27, 28, 31, 32

F

Fuentes de carbono 162, 163, 164, 165, 167, 171, 175, 176, 178, 181, 182, 184, 186, 190, 192,

193, 201, 202, 204

G

Germinación 95, 128, 130, 135

H

Huella genómica 123, 124, 125, 129, 130, 132

Humus sólido y líquido 51

I

Identidad genética 122, 130, 132

Innovaciones 97, 99, 100, 101, 103, 104, 106

Integridad intestinal 137, 152

Inteligencia Artificial 97, 100, 102

In vitro culture 87, 88

L

Larvicultura 176, 187

M

Macroalga 162, 163, 165, 167, 168, 192

Maíz azul 113, 114, 115, 116, 120, 122, 123, 124, 129, 131, 132, 135

Microalgas 164, 165, 169, 175, 176, 177, 178, 179, 184, 185, 186

Microbioma intestinal 1, 8, 10, 11, 12, 14, 15, 16, 20, 21, 143, 150, 170

Morphology 69, 156, 157, 160, 161

N

Nutrición sostenible 35

Nutrientes 14, 20, 34, 36, 37, 41, 44, 47, 50, 51, 52, 59, 63, 64, 139, 143, 149, 151, 153, 169, 178, 185, 201, 202

O

Olive tree 69, 70, 71, 85

Oreochromis niloticus 172, 188, 190, 191, 192, 202, 203, 204

Oxidation 87, 159

P

PCA 69, 71, 84

Physio-biochemical 69, 83, 84

Pinus 87, 88, 94, 95, 96

Plaguicidas 1, 4, 5, 6, 8, 15, 18, 19

Precisión 51, 97, 98, 100, 101, 102, 110, 111, 112

Problemática ambiental 25, 27, 28, 31

Producción de arroz 34, 35

Proteína 15, 53, 58, 65, 113, 115, 116, 118, 139, 140, 144, 145, 146, 177, 185, 191, 192

R

Rendimiento de arroz 35

Rendimiento productivo 136, 137, 138, 150, 152, 153

S

Salud 1, 2, 3, 4, 5, 6, 10, 13, 14, 16, 18, 20, 21, 22, 23, 27, 35, 36, 37, 122, 123, 137, 138, 139, 142, 146, 150, 151, 152, 153, 202

Salud del suelo 35, 36, 37

Seeds 87, 88, 89, 91, 92, 114, 123, 130

Steppe 69, 80, 84

Suelos de Monteria 35

Sulfato de calcio 51, 53

Sulfato de Potasio 51, 53, 58

U

Uso de biofertilizantes 35

Z

Zea mays 113, 114, 120, 122, 123, 128, 130, 135

Zea mays L. 113, 114, 120, 122, 123, 128, 135



**EDITORA
ARTEMIS**

2026