

Bionatura

International Journal of Biotechnology and Life Sciences



Iris del ojo (<https://www.freepik.es/>)



2016-2023



<https://cebaecuador.org/>



<https://www.uco.edu.co/>



<https://revistabionatura.org/>

<https://www.facebook.com/revistabionaturaEC/>

<https://www.instagram.com/revistabionaturaec>



CENTRO ECUATORIANO DE BIOTECNOLOGÍA DEL AMBIENTE-CEBA

“ENTIDAD DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA” ACREDITACIÓN SENESCYT - ACR-UNIDAD-24-5 17/06/2024

<https://cebaecuador.org/>
inf.ceba@gmail.com
Cel. (+593) 99 579 7813
Ibarra/ Ecuador, 2024

13/9/2024

<https://cebaecuador.org/>

2



Café Verde (Coffea spp.) Full Spectrum Extract

1. Obesidad y control de peso.
2. Depurativas y antioxidantes.
3. Favorece la termogénesis.

Uso: 1 ml (30 gotas) media hora antes de cada comida.

CONTACTO: Dr. Julio Pineda Insuasti, PhD
info.biodiversity@gmail.com, Cel. +593 99 758 9267
Ibarra-Ecuador

SCIENTIFIC PARTNER: <https://cebaecuador.org/>,
inf.ceba@gmail.com, Cel + 593 99 579 7813.
Ibarra-Ecuador

26/4/2026

info.biodiversity@gmail.com





CENTRO ECUATORIANO DE BIOTECNOLOGÍA DEL AMBIENTE - CEBA, es una institución de Investigación, Desarrollo e Innovación (I+D+i), constituida bajo la forma de Fundación de utilidad común, sin fines de lucro, religioso, racial y político. Es una persona jurídica de derecho privado, reconocida por el estado ecuatoriano mediante Acuerdo del Ministerio del Ambiente (MAATE) No 026 (17/03/2009), Con Registro Oficial No 579 (28/04/2009) y ACREDITACIÓN SENESCYT-ACR-UNIDAD-24-5 (17/06/2024). CEBA difunde los resultados científicos a través de sus revistas:

Bionatura: ISSN 1390-9355 (online) e ISSN 1390-9347 (impresa). <https://revistabionatura.org/>

Biorrefinería: ISSN 2602-8530 (online). <https://cebaecuador.org/publicaciones/revista-biorrefineria/>

Filosofía

CEBA mantiene su propia filosofía para el Desarrollo Social y Económico del ser humano, fundamentada en las **3S** (sabiduría, salud y seguridad).

Misión

Aportar al Desarrollo Sustentable del Ecuador y de América Latina con enfoque de Bioeconomía, mediante la aplicación de la ciencia, la tecnología y la Innovación, que permita el máximo aprovechamiento de los recursos y contribuya con el bienestar del ser humano y del planeta.

Visión

Poner al alcance de todas las personas, la cooperación científica, técnica y empresarial para la Seguridad Alimentaria, la Seguridad Energética y la Seguridad Ambiental.

Valores

Integridad, calidad, responsabilidad, liderazgo, colaboración y diversidad.

Enfoque estratégico

CEBA, se alinea con los objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la ONU y planifica su intervención a través de la “Estrategia Ecuatoriana de Bioeconomía - Horizonte 2035”, fundamentada en el aprovechamiento de la Biodiversidad, las Biomásas y las Biorrefinerías.

Julio Pineda Insuasti, PhD

DIRECTOR EJECUTIVO- CEBA

Contacto

Periférico Sur s/n, Fincas San Agustín, San Antonio. Ibarra-Ecuador

<https://cebaecuador.org/>

inf.ceba@gmail.com

info@cebaecuador.org

Cel: (+593) 99 579 7813

Bionatura

La Revista Bionatura (en inglés, Bionatura Journal) del Centro Ecuatoriano de Biotecnología del Ambiente (CEBA), fue creada en el año 2015 con la finalidad de difundir los resultados científicos y tecnológicos obtenidos de la investigación aplicada en el marco de la **Estrategia ecuatoriana de Bioeconomía-Horizonte 2035**, en el campo de las ciencias naturales, Ciencias de la Vida la Biotecnología, ensayos clínicos y médicos, Biodiversidad y Ecología en general. Publica manuscritos científicos originales del tipo empírico, revisiones, metodológicas y estudios de caso. Se edita en versión digital e impresa en idioma inglés y español con una frecuencia trimestral y está dirigida a la comunidad científica a nivel internacional. Los autores mantienen sus derechos sobre los artículos sin restricciones y opera bajo la política de Acceso Abierto a la Información, bajo la licencia de Creative Commons 4.0 CC BYNC-SA (Reconocimiento-No Comercial-Compartir igual). La revista utiliza Open Journal Systems, que es un gestor de revistas de acceso abierto y un software desarrollado, financiado y distribuido de forma gratuita por el proyecto Public Knowledge Project sujeto a la Licencia General Pública de GNU. La revista se encuentra inscrita en el Registro Nacional de Publicaciones Seriadas de la SENESCYT Ecuador e ISSN International Centre, Francia (<https://portal.issn.org/custom-search/print/1390-9355/public>).

La *misión* es aportar con conocimiento científico, técnico y económico para el desarrollo de la Bioeconomía Ecuatoriana y del mundo, mediante el uso eficiente y equilibrado de los recursos naturales, así como el aprovechamiento adecuado de los recursos genéticos microbianos, las biomasas de carbono disponible y los bioprocesos tecnológicos existentes, que permita el máximo aprovechamiento del conocimiento para el bienestar del ser humano y del planeta.

La *visión* es inspirar a las futuras generaciones para que aporten con el desarrollo social y económico del planeta, basado en una Bioeconomía respetuosa con el medioambiente y el ser humano.

El *objetivo* es difundir el conocimiento sobre los avances de la ciencia, la tecnología y la innovación de la Bioeconomía Ecuatoriana y del mundo, mediante la herramienta online, que permita llegar a la mayoría de la población.

Revista Bionatura tiene alcance nacional e internacional, con especial enfoque en el desarrollo de la Bioeconomía y dirigida a la comunidad científica.

Cobertura de Temáticas

- Ciencias Naturales
- Ciencias de la Vida
- Biotecnología
- Biomedicina
- Microbiología
- Biología
- Biodiversidad
- Bioquímica

Contacto

<https://revistabionatura.org/>

editor@revistabionatura.org

info@revistabionatura.org

Cel. (+593) 99 579 7813

Equipo Editorial

Julio Pineda Insuasti, PhD

Director Ejecutivo CEBA/ CEBA Executive Director

Alejandro Pineda Soto

Director Científico CEBA/ CEBA Scientific Director

Gustavo Reyes Lara, MSc.

Director Innovación / Innovación Director

Daymé Mederos Matos, MSc.

Director Técnico / Technical Director

- **Luisa Matos Mosqueda, PhD**
Editor Jefe / Chief Editor
- **Lourdes Crespo Zafra, PhD**
Redacción y Corrección / Writing and Correction
- **Nicolas Vaca Viteri, Tec.**
Diseño Gráfico/ Graphic Design
- **Gabriela Veloz Salazar, MSc.**
Asistente publicación / Publishing Assistant

Contacto

<https://revistabionatura.org/>
editor@revistabionatura.org
info@revistabionatura.org
Cel. +593 99 579 7813
Ibarra-Ecuador



BIONATURA

(BIONATURA JOURNAL)

ISSN 1390-9355 soporte online

ISSN 1390-9347 soporte impreso

<https://revistabionatura.org/>

editor@revistabionatura.org

<https://portal.issn.org/custom-search/print/1390-9355/public>

BIORREFINERÍA

(BIOREFINERY JOURNAL)

ISSN 2602-8530 soporte online

<https://www.cebaecuador.org/publicaciones/revista-biorrefineria/>

<https://portal.issn.org/custom-search/print/2602-8530/public>

biorrefineria.ceba@gmail.com

CONSEJO EDITORIAL / EDITORIAL BOARD

CONSEJO EDITORIAL PRINCIPAL/ PRINCIPAL EDITORIAL BOARD

Dr. Fernando Albericio, Ph.D. Full Professor.
University of KwaZulu-Natal. Durban, South
Africa.

Dr. Spiros N. Agathos, Ph.D. Full Professor.
Université Catholique de Louvain - UCLouvain.
Louvain-la-Neuve, Belgium.

Dr. Frank Alexis. Research / Full Professor. Vice
Chancellor Of Research and Innovation. Yachay
Tech University, Ecuador.

CONSEJO EDITORIAL / EDITORIAL BOARD

Dr. Gerardo Ferbeyre. Full Professor.
Département de biochimie.Faculté de Médecine.
Université de Montréal, Canadá.

Dr Frank Camacho Casanova. Ph.D , Facultad de
Ciencias Biológicas. Universidad de Concepción.
Chile.

Dr. Eduardo López Collazo. Director IdiPAZ
Institute of Biomedical Research, La Paz Hospital,
España.

Dr.Yovani Marrero-Ponce, Ph.D. Full Professor.
Universidad San Francisco de Quito (USFQ),
Quito, Ecuador.

Dr. Manuel Limonta, Prof. PhD. Director:
Regional Office for Latin American and the
Caribbean International Council for Science
(ICSU). Doctor honoris causa Autonomous
Metropolitan University of México City (UAM).
Dr. Honoris Causa - Universidad Central Ecuador.

Dr. Dagoberto Castro – Restrepo. Prof. PhD.
Research and Development Director. Universidad
Catolica del Oriente. Rio Negro. Colombia.

Dr. Michael Szardenings. PhD. Ligand
Development Unit.Fraunhofer Institute for Cell
Therapy and Immunology.Germany.

Dra. Luciana Dente. Research Professor
University of Pisa, Italy.

Dr. Costantino Vetriani. Research / Full Professor.
Rutgers, The State University of New Jersey. USA.

Dr. Si Amar Dahoumane, PhD. Research /
Professor. Yachay Tech University, Ecuador.

Dr. Amit Chandra, MD, MSC, FACEP Global
Health Specialist, Emergency Physician Millennium
Challenge Corporation, London School of
Economics and Political Science.

Dr. Silvio e. Perea, PhD. Head of the Molecular
Oncology Laboratory. Centro de Ingeniería
Genética y Biotecnología. Cuba.

Dra. Maritza Pupo. Profesora investigadora.
Facultad de Biología. Universidad de la Habana,
Cuba.

Dr. Fidel Ovidio Castro. Founder, Profesor
investigador. Tecelvet, Chile.

Dra. Olga Moreno. Partner, Head Patent Division.
Jarry IP SpA, Chile.

Dr. Carlos Borroto. Asesor de Transferencia de
Tecnología. Dirección General at Centro de
Investigaciones Científicas de Yucatán (CICY),
México.

Dr. Javier Menéndez. Manager Specialist Process
and Product 5cP. Sanofi Pasteur, Canadá.

Dr. Pedro Valiente. Profesor investigador.
Facultad de Biología. Universidad de la Habana,
Cuba.

Dr. Diógenes Infante. Prometeo / SENESCYT.
Especialista de primer nivel en Biotecnología.
Universidad de Yachay Tech, Ecuador.

Dra. Georgina Michelena. Profesora Investigador.
Organización de las Naciones Unidas. (ONU),
Suiza.

Dr. Francisco Barona, Profesor Asociado.
Langebio Institute, México

Dr. Gustavo de la Riva. Profesor Investigador
Titular. Instituto Tecnológico Superior de Irapuato,
México.

Dr. Manuel Mansur. New Product Introduction
Scientist (NPI) at Elanco Animal Health Ireland,
Irlanda.

Dr. Rolando Pajón. Associate Scientist,
Meningococcal Pathogenesis and Vaccine Researc.
Center for Immunobiology and Vaccine
Development, UCSF Benioff Children's Hospital
Oakland", Estados Unidos.

Dra. Lleana Rosado Ruiz-Apodaca. Profesor /
Investigador. Universidad
de Guayaquil, Ecuador.

Dr. Carlos Eduardo Giraldo Sánchez, PhD.
Profesor / Investigador. Universidad Católica de
Oriente. Rionegro-Antioquia/Colombia.

Dr. Mario Alberto Quijano Abril, PhD. Profesor
/ Investigador. Universidad Católica de Oriente.
Rionegro-Antioquia/Colombia.

Dr. Felipe Rojas Rodas, PhD. Profesor /
Investigador. Universidad Católica de
Oriente.Rionegro-Antioquia/Colombia.

Dra. Isabel Cristina Zapata Vahos. Profesor /
Investigador. Universidad Católica de
Oriente.Rionegro-Antioquia/Colombia.

Dr. Felipe Rafael Garcés Fiallos, PhD. Profesor /
Investigador. Vicerrectorado de Investigación,

Dra. Daynet Sosa del Castillo, PhD. Directora del Centro de Investigaciones Biotecnológicas del Ecuador. CIBE-ESPOL.

Dra. Consuelo Macías Abraham. Especialista de II Grado en Inmunología, Investigadora y Profesora Titular, Doctora en Ciencias Médicas y Miembro Titular de la Academia de Ciencias de Cuba.

Directora del Instituto de Hematología e Inmunología (IHI), de La Habana, Cuba.

Dr. René Delgado, PhD. IFAL / Presidente Sociedad Cubana de Farmacología. Cuba.

Dr. Ramón Guimil. Senior Director.

Oligonucleotide Chemistry bei Synthetic Genomics, Estados Unidos.

Dr. Eduardo Penton. MD, PhD. Investigador Titular. Centro de Ingeniería Genética y Biotecnología, Cuba.

Dr. Julio Raúl Fernández Massó, PhD.

Investigador Titular. Centro de Ingeniería Genética y Biotecnología, Cuba

Dra. Lisset Hermida. Investigadora Titular. Centro de Ingeniería Genética y Biotecnología, Cuba.

Dr. Tirso Pons. Staff Scientist. Structural Biology and Biocomputing Programme (CNIO), España.

Dr. Che Serguera. French Institute of Health and Medical Research. MIRCen, CEA, Fontenay-aux-Roses Paris, France.

Dr. Jorge Roberto Toledo. Profesor Asociado. Universidad de Concepción, Chile.

Dr. Oliberto Sánchez. Profesor Asociado. Universidad de Concepción, Chile.

Dr. Amina Sánchez Rodríguez, PhD. Director del departamento de Ciencias Biológicas, Universidad Técnica Particular de Loja, Ecuador.

Gestión Social del Conocimiento y Posgrado Universidad de Guayaquil (UG), Ecuador.

Dra. Celia Fernández Ortega, PhD. Investigadora Titular. Centro de Ingeniería Genética y Biotecnología, Editora ejecutiva Biotecnología Aplicada. Cuba.

Dra. Ligia Isabel Ayala Navarrete, PhD. Profesor / Investigador. Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE. Ecuador.

Dr. Nalini kanta Sahoo, PhD. Professor & Head Department Marri Laxman Reddy Institute of Pharmacy. Hyderabad, Andhra Pradesh, India.

Dr. Saman Esmaeilnejad, PhD. Department of medical sciences, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

Dr. Olukayode Karunwi, PhD. Research / Professor. Clemson University. Clemson, United States.

César Paz-y-Miño, MD. MSc. Dr. Facultad de Ciencias de la Salud “Eugenio Espejo”, Universidad UTE, Quito, Ecuador.

Dra. Rosa Victoria González Zambrano, PhD.

Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López: Calceta, Provincia de Manabí, Ecuador.

Dr. Gualberto León Revelo, PhD. Universidad Politécnica Estatal Del Carchi: Tulcán, Carchi, Ecuador.

Dr. Ernesto Alonso Rosero Delgado, PhD. Universidad Técnica de Manabí, Ecuador.

Juan Carlos Fiallos Quinteros, MSc.

Centro Ecuatoriano de Biotecnología y Ambiente: Ibarra, Imbabura, Ecuador.

CONTENIDO

1. Physical mutagenesis: a platform for genomic plasticity and genetic variability in crops of agronomic interest	9
2. Algunas consideraciones de la fotografía digital del iris para confección estética de prótesis ocular	33
3. El hidromiel entre tradición e innovación: revisión de su evolución histórica, tecnológica y de mercado con énfasis en Latinoamérica y Cuba	46
4. Metales pesados y salud neurológica: una revisión sobre su efecto acumulativo y riesgos para la salud pública	64
5. Using L-arginine hydrochloride as a preservative for polymerase enzymes in room temperatures	77
6. Improvements in the solubilization of the tt-p0-ls chimeric protein, a subunit vaccine candidate against sea lice active ingredient of the salvac del norte vaccine candidate	89
7. Tareas Integradoras sustentadas en la inteligencia artificial para el desarrollo de competencias ambientales	110
8. Metodología educativa para el desarrollo de la cultura económica en los micro productores ecuatorianos	131
9. Alternativas para la reproducción del <i>Trichoderma</i> spp. en condiciones de laboratorio	148
10. Estudio de la variabilidad espacial de la resistencia de penetración en un vertisol pélico de la cuenca del río Cauto	164

Review article

Physical mutagenesis: a platform for genomic plasticity and genetic variability in crops of agronomic interest

Daniel Martin-Vargas ^{1,*}, Mariana Andrade ², Alberto Quintero ³

¹ Venezuelan Institute for Scientific Research. Miranda, Venezuela;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5422-4742>

² Venezuelan Institute for Scientific Research. Miranda, Venezuela;

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-1072-9545>

³ Venezuelan Institute for Scientific Research. Miranda, Venezuela;

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-9229-0453>

* Correspondence: danielmartin390@gmail.com

<https://doi.org/10.70373/RB/2026.11.01.1>

Abstract

Abstract Modern plant breeding faces the challenge of developing resilient crop varieties for global food security. In this context, induced mutagenesis using physical agents, particularly ionizing radiation, has been positioned as an effective tool for generating genetic variability. This review explores the underlying molecular mechanisms, where radiation induces both direct and indirect damage to the DNA, leading to point mutations and, crucially, double-strand breaks (DSBs). These genomic alterations trigger genomic plasticity, which is fundamental to the success of plant breeding programs. Success stories are referenced, demonstrating the technique's efficacy in improving key agronomic traits. These include the creation of mutants with resistance or tolerance to different biotic or abiotic stress conditions, as well as genotypes with higher yield and nutritional value. The capacity of mutagenesis to optimize plant architecture is also demonstrated, which facilitates mechanical harvesting, significantly reduces field losses, and lowers production costs. In conclusion, the ability of physical agents to induce mutations in complex quantitative traits positions mutagenesis as a vital solution against climate change and the increasing demand for sustainable crops. The future integration of mutagenesis with omics technologies and gene-editing tools like CRISPR/Cas9 promises unprecedented precision and efficiency. This synergistic approach reaffirms that physical mutagenesis is not an obsolete technique, but a key platform, complementary to gene editing, for accelerating the development of a new generation of crops.

Keywords: food security, ionizing radiation, plant breeding, resilient varieties.

Mutagénesis física: una plataforma para la plasticidad genómica y la variabilidad genética en cultivos de interés agronómico

Resumen

El fitomejoramiento moderno enfrenta el desafío de desarrollar variedades de cultivos resilientes para la seguridad alimentaria global. En este contexto, la mutagénesis inducida con agentes físicos, particularmente la radiación ionizante, se ha posicionado como una herramienta eficaz para generar variabilidad genética. Esta revisión explora los mecanismos moleculares subyacentes, donde la radiación induce daño tanto directo como indirecto al ADN, lo que genera mutaciones puntuales y, de manera crucial, roturas de doble cadena (DSBs). Estas alteraciones genómicas desencadenan una plasticidad genómica fundamental para el éxito de los programas de fitomejoramiento. Se refieren casos de éxito que demuestran la eficacia de la técnica para mejorar rasgos agronómicos clave. Estos incluyen la creación de mutantes con resistencia o tolerancia a diferentes condiciones de estrés biótico o abiótico, así como genotipos con mayor rendimiento y valor nutricional. Se muestra también la capacidad de la mutagénesis para optimizar la arquitectura de la planta, lo que facilita la cosecha mecánica, reduce significativamente las pérdidas en el campo y disminuye los costos de producción. En conclusión, la habilidad de los agentes físicos para inducir mutaciones en caracteres cuantitativos complejos posiciona a la mutagénesis como una solución vital frente al cambio climático y la creciente demanda de cultivos sostenibles. La integración futura de la mutagénesis con tecnologías ómicas y herramientas de edición génica como CRISPR/Cas9 promete una precisión y eficiencia sin precedentes. Este enfoque sinérgico reafirma que la mutagénesis física no es una técnica obsoleta, sino una plataforma clave, complementaria a la edición génica, para acelerar el desarrollo de una nueva generación de cultivos.

Palabras clave: fitomejoramiento, radiación ionizante, seguridad alimentaria, variedades resilientes

1. Introduction

In a context of unprecedented population growth and the acceleration of climate change, global agriculture faces one of its most critical challenges ¹. Food security, a cornerstone of the social and economic stability of nations, is directly threatened by extreme climate variability, soil degradation, and the proliferation of pests and diseases—factors that have begun to undermine crop productivity globally ². This unsustainable pressure underscores the urgency of moving beyond traditional genetic improvement strategies and developing plant varieties that are intrinsically more resilient and productive to ensure the future of human nutrition ¹.

Genetic variability is the cornerstone of plant breeding, serving as the driving force behind species adaptability and the development of new cultivars^{3,4}. Historically, breeding programs have relied on traditional sources of variation, such as sexual recombination through crossing and spontaneous mutations⁵. However, in the context of modern challenges, these sources are increasingly limited. The slow emergence of natural mutations, coupled with the narrow genetic base of many domesticated crops, restricts the spectrum of available variability, making it difficult to obtain urgent traits such as tolerance to extreme conditions⁶.

The pace of natural evolution, although constant, is insufficient to generate the variability needed to address the growing demands of food security⁷. In this context, induced mutagenesis using physical agents emerges as a proactive strategy, acting as an evolutionary accelerator that generates massive genetic variability, overcoming the limitations of natural selection^{8,9}. Although historically fundamental to the success of modern agriculture, as evidenced during the Green Revolution, physical mutagenesis has intensified its relevance in the era of advanced biotechnology.

Far from being an obsolete technology, physical mutagenesis is positioned as a complementary platform to gene-editing tools like CRISPR-Cas¹⁰. The controlled application of gamma radiation or X-rays allows plant breeders to create a wide range of novel alleles and desirable agronomic traits^{11,12}. This synergism is the main justification for its continued importance in the fight for food security, as it provides an inexhaustible source of variation for gene discovery and the creation of new alleles not found in nature⁹.

This review transcends the conventional view of physical mutagenesis as a simple technique for inducing random mutations. Our main thesis establishes that this methodological strategy represents a robust platform for the efficient induction of genomic plasticity, a fundamental trait that confers upon plants the capacity to flexibly respond to their environment. This plasticity, in turn, facilitates the emergence of valuable agronomic characteristics, such as tolerance to biotic and abiotic stress conditions or increased biomass production. By adopting this new paradigm, we re-evaluate the potential of physical mutagenesis to drive adaptation and genetic innovation in crop improvement.

2. Mechanisms of action of ionizing radiation on DNA

Understanding the molecular mechanisms by which ionizing radiation induces mutations is fundamental to optimizing its use in plant breeding. The biological effects of agents such as gamma rays and X-rays are not limited to a single type of interaction, but rather manifest through a complex cascade of events that compromise the integrity of deoxyribonucleic acid (DNA), inducing changes ranging from structural and numerical alterations to visible chromosomal aberrations in plant species

¹³. These phenomena occur through two main pathways which, although distinct, operate synergistically: direct damage, where the radiation energy directly impacts the DNA molecule, and indirect damage, a predominant mechanism mediated by the radiolysis of surrounding water molecules and the consequent formation of highly reactive free radicals ⁸.

The imbalance in cellular homeostasis caused by these interactions initiates a series of molecular events that, if not correctly repaired, lead to the formation of point mutations and chromosomal rearrangements ¹⁴. It is these genomic alterations, and their wide range, that make ionizing radiation such a powerful tool for generating genetic variability, serving as the basis for the development of new and valuable agronomic traits ¹⁵. Despite the emergence of precision technologies, the study of these mechanisms remains vital for understanding genomic plasticity and the continuous relevance of mutagenesis in the era of advanced biotechnology, constituting an essential point of comparison for evaluating the risks of new techniques and the evolution of the crop resilience paradigm ¹⁶.

2.1. Direct damage: primary mechanism of molecular interaction

Ionizing radiation, upon penetrating the cell, can interact directly with the DNA molecule, depositing its energy and causing immediate damage to its structure. This mechanism, known as direct damage, occurs when photons or ionizing particles, such as gamma rays or beta particles, impact the atoms that compose the deoxyribose-phosphate backbone or the nitrogenous bases of the double helix ¹⁷.

Although this interaction is energetically inefficient and accounts for a fraction of the total damage (approximately 30%), its genomic consequences are substantial. The absorption of energy can trigger the rupture of covalent bonds, resulting in single-strand breaks (SSBs) or, more critically, double-strand breaks (DSBs), which are the most severe lesions and the most difficult for cellular systems to repair ¹⁸.

DSBs are the most lethal type of lesion for the genome and the main trigger of mutations and chromosomal rearrangements. When the cell's repair systems fail to correct these lesions accurately, error-prone repair pathways, such as non-homologous end joining (NHEJ) ^{19,20}, are initiated. These processes can result in the deletion of large DNA segments, as well as large-scale translocations and inversions—phenomena that excessively alter the genome structure and are crucial for generating the desirable genetic variability in plant breeding ^{17,21}. Therefore, by inducing these DSBs, direct damage becomes a fundamental pillar for creating the genetic diversity required for crop adaptation.

2.2. Indirect damage: the predominant mechanism of ionizing radiation

The primary mechanism by which ionizing radiation causes genetic damage is through an indirect pathway, which accounts for approximately 70% of the total DNA damage ¹⁷. This process begins with the radiolysis of water, as ionizing radiation, upon passing through the cell nucleus, interacts

with the water molecule (H₂O), the most abundant compound in the environment, instead of directly impacting the DNA. This interaction deposits its energy into the water molecules, causing their dissociation into a series of highly reactive and transient species, such as hydrogen radicals (•H), hydrated electrons (e_{aq}^-), and, most critically, the hydroxyl radical (•OH)²².

These free radicals, particularly the •OH radical, are extremely reactive and rapidly migrate to attack the adjacent DNA molecule. The reactivity of the radical makes it a formidable aggressor, capable of causing a wide range of DNA lesions, including the oxidation of nitrogenous bases, the rupture of bonds in the deoxyribose-phosphate backbone, and the induction of SSBs¹⁷. The resulting SSBs are frequently converted into DSBs during DNA replication, which underscores the importance of indirect damage as the main driver of mutations and chromosomal rearrangements in induced mutagenesis.

3. Genomic effects of physically induced mutagenesis

Ionizing radiation has been positioned as a crucial tool in biology and plant breeding for inducing mutagenesis and generating genetic variability^{9,23}. At the genomic level, its impact is manifested through a series of molecular lesions that drive mutation. These interactions produce a variety of damage, ranging from point mutations and small insertions/deletions (INDELs)—frequent due to base oxidation—to the most serious and destabilizing lesion: DSBs, which have a high impact on the genomic plasticity of irradiated plants^{17,24}.

Indeed, these DSBs are the hallmark of radiation damage. Their incorrect or incomplete repair can lead to complex chromosomal rearrangements, including large-scale translocations and deletions, which fundamentally reconfigure the genome and create the basis for genetic variability^{18,21}.

3.1. Point mutations and small insertions/deletions

Point mutations and small insertions/deletions (INDELs) represent smaller-scale alterations that can have a profound impact on gene function and phenotypic expression²⁴. These small-scale mutations are the result of DNA damage. Indirect damage, mediated by the highly reactive •OH radical generated by water radiolysis, is a key mechanism for the induction of these mutations. The •OH is capable of oxidizing bases, creating lesions that, if not repaired correctly, can result in mutations and the induction of clustered damage^{22,25}.

At the molecular level, radiation damage is materialized in the alteration of nitrogenous bases and the rupture of phosphodiester bonds in the deoxyribose-phosphate backbone. When bases are oxidized, lesions such as 8-oxoguanine can form, which, during DNA replication, can incorrectly pair with adenine instead of cytosine, resulting in a point mutation^{26,27}.

Similarly, SSBs or the rupture of phosphodiester bonds can be incorrectly processed by repair systems, leading to the loss or addition of one or more nucleotides, generating INDELS that frequently induce frameshifts and the consequent loss of protein function ¹⁹.

In the context of plant breeding, the induction of small-scale mutations is of maximum relevance, given that they generate functional variability without incurring the lethal or unfavorable consequences associated with large-scale lesions. This distinction between small-scale genomic damage and destabilizing chromosomal-level damage is crucial ^{24,28}. Consequently, the detailed analysis of small-scale mutations is indispensable for unraveling genetic diversity and establishing the molecular basis of the phenotypic variability generated through induced mutagenesis ¹⁷.

3.2. Double-Strand Breaks (DSBs)

Exposure to ionizing radiation represents a significant threat to genome integrity, with DSBs being the most severe and biologically relevant lesion ¹⁷. DSBs are characterized by the simultaneous or near-simultaneous rupture of both DNA strands, and they are formed as a result of both direct and indirect damage. The high linear energy transfer (LET) of certain types of radiation is particularly efficient in inducing complex and clustered DSBs, which exacerbates the challenge of cellular repair ^{29,30}.

The critical role of DSBs lies in the difficulty of their repair. While SSBs are repaired with high fidelity, the repair of DSBs presents a significant risk of error. The cellular repair system can resort to two main pathways: homologous recombination (HR), which is a high-fidelity process, and non-homologous end joining (NHEJ), which is more error-prone ^{29,31}.

If NHEJ repair is performed incorrectly or if multiple DSBs are repaired with each other, a variety of aberrant chromosomal rearrangements can be generated. These rearrangements, including translocations, deletions, and inversions, are the main causes of genomic instability and are considered the key events in induced plant mutagenesis ^{18,32}.

In the context of plant breeding, the induction of DSBs is a dual strategy. They are the most dangerous lesions that can lead to cell death, but their faulty repair is the main source of large-scale genetic variability, which is fundamental for the creation of new crop varieties ^{9,30}. Understanding the formation and repair of DSBs is, therefore, essential for manipulating radiation mutagenesis in a controlled and effective manner.

3.3. Chromosomal rearrangements

Chromosomal rearrangements represent the most significant large-scale mutations and are a direct consequence of the incorrect repair of DSBs, the most lethal lesion induced by ionizing radiation.

While the high-fidelity repair pathway, HR, generally ensures precise repair, the NHEJ pathway is error-prone^{20,33}. If multiple DSBs are generated, the broken ends can be incorrectly joined, leading to chromosomal aberrations such as translocations and inversions; translocations occur when a chromosome fragment attaches to a non-homologous one, and inversions involve the reversal of a DNA segment within the same chromosome³⁴. These events alter the genome structure and can fundamentally change gene expression by moving genes to new locations³².

In addition to translocations and inversions, faulty DSB repair can also result in chromosomal deletions, the loss of an entire DNA segment, which may span multiple genes^{18,20}. Deletions are particularly detrimental, as they can lead to the inactivation of essential genes or the disruption of genetic sequences, resulting in severe consequences for cell viability and function^{35,36}. By inducing a high number of DSBs, radiation significantly increases the probability of these repair errors, making chromosomal rearrangements a distinctive characteristic of induced genetic damage^{30,34}.

In the field of plant breeding, the induction of chromosomal rearrangements is considered a double-edged sword: while they can be lethal to the individual, they represent a vital and historical source of genetic variability for the selection of desirable agronomic traits⁸. This calculated risk justifies the continued use of mutagenic agents in the generation of new cultivars. Rearrangements can alter the inheritance pattern of genes and confer new genetic combinations that result in improved agronomic characteristics, including the crucial resistance to diseases or tolerance to environmental stress.

This principle justifies the use of mutagenic agents to drive variability in crops and lays the foundation for modern chromosomal engineering^{9,37}. The precise understanding of the mechanisms underlying these chromosomal rearrangements, particularly DSB repair, is crucial for optimizing mutagenesis techniques and selecting mutants efficiently^{36,37}.

4. Applications in plant genetic improvement

Traditionally, diversity has relied on natural variation, sexual recombination, and spontaneous mutations—processes that operate at an intrinsically low rate. However, to meet the demands of a growing population and adapt crops to increasingly unpredictable environmental and biotic conditions, breeders have strategically resorted to using induced mutagenesis with ionizing radiation as a powerful and efficient tool³⁸. The capacity of radiation to induce a broad spectrum of mutations randomly and at a high frequency in the genome, which form the basis for improved resistance and productivity traits, solidifies its role as a fundamental pillar in sustainable agriculture³⁹.

Induced mutagenesis has proven to be one of the most efficient tools for accelerating the mutation rate and generating a wide range of genetic variability in crops^{9,38}. This technique has been

instrumental in the development of more than 3,400 mutant crop varieties cultivated worldwide, thus solidifying the role of mutagenesis as an indispensable tool in breeding ⁴⁰.

Its contribution to global food security and the development of resilient cultivars in the face of the climate crisis is widely documented ³⁹. Its application includes the creation of new traits and agronomic improvements (tolerance to biotic and abiotic stress, improvements in terms of quality), the rectification of specific traits, and the generation of variability in vegetatively propagated crops ^{12,41}.

4.1. Generation of genetic variability and genomic plasticity

Genetic variability is the engine of evolution and the fundamental pillar of any crop breeding program. Although natural diversity and traditional crosses have historically been the main source of new alleles, these processes are intrinsically slow and insufficient to meet the urgency of crop improvement in the current era ^{4,16,38}. To respond to growing global demands for agricultural production and the need to adapt crops to a changing environment, physically induced mutagenesis has solidified its role as a tool to accelerate the generation of this variability ^{9,42}.

4.2. Improvement of agronomic traits

The adaptation of crops to biotic and abiotic stress conditions is a fundamental pillar for global food security, a challenge that has intensified due to climate change and the emergence of new pests and diseases. In this context, induced mutagenesis has solidified its role as a powerful and proven strategy to generate the necessary genetic variability for plant breeding. Unlike conventional breeding techniques, which rely on natural variability and are intrinsically slow, mutagenesis offers an efficient pathway for the creation of new alleles and the diversification of the gene pool, which is essential for the development of resilient crops in a changing environment ¹⁶. This contrast underscores that traditional breeding, though valuable, is based on processes that do not align with the speed of current agricultural challenges.

At the molecular level, the key to the genetic improvement process resides in the induction of DSBs. Although DSBs represent the most dangerous type of DNA damage, their repair is the basis of genomic plasticity, resulting in a broad spectrum of mutations ranging from single base-pair changes to large-scale chromosomal rearrangements ^{43,44}. This massive variability, leveraged by plant breeders, has proven effective in improving key agronomic traits, including resistance and tolerance to pathogens ⁴⁵, to drought and salinity ⁴⁶, improvement of yield and nutritional value ⁴⁷, and modification of plant architecture ⁴⁸. In this way, physical mutagenesis emerges as an indispensable tool in building more resilient and sustainable agricultural systems for the future.

4.2.1. Progress against biotic and abiotic stress challenges

Global food security faces an unprecedented crisis, demanding the development of resilient crops that can withstand biotic and abiotic stress, challenges intensified by climate change and the emergence of new pests^{49,50}.

In this context, induced mutagenesis with ionizing radiation has solidified its role as a fundamental and proven strategy to generate the necessary genetic variability for modern plant breeding⁵¹. Its most significant application is the improvement of crop resistance to various stress factors, both biotic (pests and diseases) and abiotic (environmental), thus demonstrating its crucial role in adapting agriculture to climate change^{12,52}.

The ability to generate a broad spectrum of mutations randomly and at high frequency allows breeders to access genetic variants that are not found in the natural germplasm⁵³. This process is fundamental for the exploration of genetic diversity in plant species, thus constituting a strategic pillar in modern plant breeding²³.

For example, rice varieties with tolerance to multiple types of abiotic stress have been successfully developed through the combination of gamma radiation and in vitro tissue culture⁵⁴. More specifically, the obtainment of rice mutants with tolerance to drought and salinity^{55,56}, as well as tolerance to submergence⁵⁷, has been validated. Similarly, the technique has been applied to develop chickpea lines tolerant to glyphosate⁵⁸, considering the challenge in agriculture for weed control.

On the other hand, it has also successfully generated mutants with tolerance to biotic stress, including quarantine diseases that threaten global food security. This is the case with resistance to the fungus *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* (Foc), the causal agent of Fusarium wilt in banana⁵⁹, which is considered the most devastating disease of the *Musa* genus worldwide. Similarly, resistance has been achieved to the bacterium *Candidatus Liberibacter*⁶⁰, which causes Huanglongbing (HLB), considered the most destructive disease of citrus globally.

These advances not only confirm the technical feasibility of physical mutagenesis but also validate its crucial role in building more resilient and sustainable agricultural systems for the future. The use of cutting-edge analyses such as transcriptomic and metabolomic characterization allows for the identification of the molecular mechanisms that confer tolerance to abiotic stresses, such as salinity in barley⁶¹. Additionally, the implementation of advanced technologies like carbon ion beam radiation⁶², strengthens mutagenesis as a precise tool for genetic improvement. Table 1 presents some progress in the generation of tolerant and resistant variants to different biotic and abiotic stress conditions in various crops of agronomic interest.

Table 1. Cases of physical mutagenesis: inducing biotic and abiotic stress tolerance in crops

Crop	Physical mutagen	Valued Trait(s)	Ref.
Wheat (<i>Triticum aestivum</i>)	Gamma rays	Resistance to <i>Puccinia triticina</i> (Leaf and stem rust)	63, 64
Rice (<i>Oryza sativa</i>)	Gamma rays	Tolerance to multiple types of abiotic stress	54
	Gamma rays	Salinity tolerance	56
	Gamma rays	Lodging resistance	65
Barley (<i>Hordeum vulgare</i>)	Gamma rays	Submergence tolerance	57
	Gamma rays	High salinity tolerance	61
Maize (<i>Zea mays</i>)	Gamma rays	Drought and salinity tolerance	66, 67
Soybean (<i>Glycine max</i>)	Gamma rays	Salinity tolerance	68
	Gamma rays	Tolerance to <i>Macrophomina phaseolina</i> (charcoal rot)	69
Potato (<i>Solanum tuberosum</i>)	Gamma rays	Resistance to <i>Rhizoctonia solani</i> (Stem canker and black scurf)	70
	Gamma rays	Resistance to <i>Ralstonia solanacearum</i> (Bacterial wilt)	71
Cassava (<i>Manihot esculenta</i>)	Gamma rays	Resistance to viruses (Viral diseases)	72
Sugarcane (<i>Saccharum officinarum</i>)	Gamma rays	Drought tolerance	73
Banana (<i>Musa paradisiaca</i>)	Gamma rays	Resistance to <i>Fusarium oxysporum</i> f. sp. cubense (Foc) (Fusarium wilt)	59
Cowpea (<i>Vigna unguiculata</i>)	Gamma rays	Drought resilience	74

4.2.2. Progress in yield and quality

The increasing global demand for food and the need for superior nutrition have positioned the improvement of crop yield and quality as central objectives of plant breeding^{75,76}. In this context, induced mutagenesis with ionizing radiation has solidified its role as an invaluable tool in plant breeding, offering an effective pathway for the creation of genetic variability; this technique translates into higher productivity and superior nutritional value in crops^{38,74}.

Many advances confirm the crucial role of ionizing radiation not only in increasing productivity but also in enriching the nutritional profile of crops⁷⁷. This potential is fundamental for addressing the

challenges of global food security and malnutrition, positioning mutagenesis as a non-invasive and indispensable technology in modern breeding strategies ³⁸.

Success stories validate its application, where it has been shown that optimizing radiation doses induces physiological and morphological changes that increase seed productivity in wheat ⁷⁸. Similarly, the impact of gamma radiation on the nutritional properties of barley microgreens has been validated ⁷⁹. These findings are complemented by studies in rice, where gamma ray mutagenesis not only increases agronomic yield but also induces profound changes in the plant's biochemical composition ⁸⁰. In legumes, new genetic lines with superior yield have been developed in lentils ⁸¹, peanut ⁸², and chickpea ⁸³. It has also been validated that gamma ray-induced mutations are an effective tool for biofortification, such as increasing the content of oil and protein levels in soybean ⁴⁷, which enhances its nutritional value and industrial yield.

These findings not only confirm the capacity of ionizing radiation to increase productivity and yield but also validate its potential to enrich the nutritional profile of crops, a crucial factor for addressing global food security and malnutrition. Table 2 presents some progress in improving the yield, productivity, and nutritional quality in various crops.

Table 2. Cases of physical mutagenesis: improving crop yield and nutritional value

Crop	Physical mutagen	Valued Trait(s)	Ref.
Wheat (<i>Triticum aestivum</i>)	Gamma rays	Seed yield	77
Rice (<i>Oryza sativa</i>)	Gamma rays	Phytochemical and phytohormonal profiles	79
Barley (<i>Hordeum vulgare</i>)	Gamma rays	Phytochemical and bioactive compounds	78
	Nitrogen ion beam	High yield (grain weight and ear type)	84
Maize (<i>Zea mays</i>)	X-rays	Improvement in growth, yield, and nutritional value	85
Soybean (<i>Glycine max</i>)	Gamma rays	Increased oil and protein content	47
Potato (<i>Solanum tuberosum</i>)	Gamma rays	Physicochemical and functional properties	86
Sugarcane (<i>Saccharum officinarum</i>)	Gamma rays	Physiological, biochemical, and yield traits	87
Banana (<i>Musa paradisiaca</i>)	Gamma rays	Plant height and pseudostem girth	88

Coffee (<i>Coffea arabica</i> L.)	Gamma rays	Germination and seedling vigor	89
Tomato (<i>Solanum lycopersicum</i> L.)	Gamma rays	Increased phenolic compounds and carotenoids	90

4.2.3. Progress in plant architecture

Plant architecture is a crucial objective in plant breeding, since an optimal structure can directly influence photosynthetic efficiency, stress tolerance, and, fundamentally, the ease of harvest ^{91,92}. Induced mutagenesis with ionizing radiation has allowed for the specific modification of these morphological traits, enabling scientists to "design" plants with superior agronomic characteristics ^{93,94}.

Ionizing radiation can induce mutations that alter plant height, panicle size, leaf angle, or even straw hardness, thereby generating improved genotypes that facilitate mechanical harvesting and reduce field losses ^{95,96}. Success stories in this area not only confirm the ability of mutagenesis to influence architecture but also validate its potential to transform agricultural productivity and make it more efficient. Some achievements obtained in various crops of agronomic interest through physical mutagenesis, focused on modifying plant architecture, are detailed in Table 3.

Table 3. Physical mutagenesis cases for advancing crop morpho architecture.

Crop	Physical mutagen	Valued Trait(s)	Ref.
Rice (<i>Oryza sativa</i>)	Gamma rays	Plant height (lodging resistance)	97
Barley (<i>Hordeum vulgare</i>)	Gamma rays	Plant height and effective tiller number	98
Wheat (<i>Triticum aestivum</i>)	Gamma rays	Production of Doubled Haploid (DH) Lines	99
Cotton (<i>Gossypium hirsutum</i> L.)	Linear electron accelerator	Fiber length and strength, plant morphology	100
Chili (<i>Capsicum annuum</i>)	Gamma rays	Height, branching, and plant hape/form. Number, weight, and size of the fruit.	101
Lentil (<i>Lens culinaris</i> Medik.)	Gamma rays	Plant height, root length, pod number	102
Peanut (<i>Arachis hypogaea</i> L.)	Gamma rays	Plant height, biomass, and leaf structure	103
Mango (<i>Mangifera indica</i>)	Gamma rays	Plant growth and leaf size	104

Banana (<i>Musa acuminata</i> L.)	Gamma rays	Short stature (lodging resistance)	105
Coffee (<i>Coffea arabica</i> L.)	Gamma rays	Short stature (lodging resistance)	106

5. Conclusions and future perspectives

Induced mutagenesis with physical agents, particularly ionizing radiation, has solidified its role as a powerful and irreplaceable tool in modern plant breeding. Throughout this work, we have elucidated that its effectiveness lies in the ability to generate broad and random genetic variability, while the underlying molecular mechanisms, such as DNA double-strand breaks (DSBs), provide the basis for developing genotypes with superior agronomic traits. The resulting genetic damage is not merely destructive; on the contrary, it fosters a genomic plasticity that, when channeled through rigorous selection programs, leads to the creation of new varieties with high-value attributes.

We have demonstrated, through concrete success stories, that physical mutagenesis is a proven strategy for improving resistance to biotic and abiotic stresses, optimizing yield and nutritional quality, and, crucially, redesigning plant architecture for greater harvesting efficiency. The ability to induce mutations in complex and quantitative characters positions this technique as a fundamental solution to the challenges of global food security, climate change, and the increasing demand for sustainable crops.

Looking ahead, the synergy between physical mutagenesis and cutting-edge omics technologies is the path forward for unprecedented advancement. The application of next-generation genomics will allow for the exhaustive characterization of mutants at the molecular level, precisely identifying the genes and altered alleles responsible for the desired phenotypes. This will not only accelerate the selection process but will also provide essential information to elucidate the molecular networks and genetic mechanisms underlying complex traits.

We propose the integration of mutagenesis with CRISPR/Cas9 technology. Induced mutagenesis programs could massively generate mutant libraries, which would then be screened using gene editing tools to rapidly identify and validate gene function. This combined approach could significantly reduce the development time for new varieties.

Furthermore, the use of ion beam radiation, which offers greater spatial precision and a lower random distribution of mutations, opens the door to more targeted and controlled mutagenesis, minimizing undesired effects and maximizing efficiency.

Physical mutagenesis is not a technology of the past; it is a key tool for the future of agriculture, facilitating the creation of a new generation of more resilient, nutritious, and productive crops for a constantly changing world.

Author Contributions: Conceptualization, D.M-V.; methodology, D.M-V.; Validation: M.A and A.Q.; Formal analysis: D.M-V and A.Q.; Investigation: D.M-V, M.A and A.Q.; Writing – original draft preparation: D.M-V.; Writing – review and editing: M.A and A.Q. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research received no external funding.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. Munaweera T, Jayawardana N, Rajaratnam R, Dissanayake N. Modern plant biotechnology as a strategy in addressing climate change and attaining food security. *Agric Food Secur.* 2022;11(1):1-28. doi: 10.1186/s40066-022-00369-2.
2. Saleem A, Anwar S, Nawaz T, Fahad S, Saud S, Ur Rahman T, et al. Securing a sustainable future: the climate change threat to agriculture, food security, and sustainable development goals. *J Umm Al-Qura Univ Appl Sci.* 2025;11(3):595-611. doi: 10.1007/s43994-024-00177-3.
3. Swarup S, Cargill E, Crosby K, Flagel L, Kniskern J, Glenn K. Genetic diversity is indispensable for plant breeding to improve crops. *Crop Sci.* 2021;61(2):839-852. doi: 10.1002/csc2.20377.
4. Salgotra R, Chauhan B. Genetic diversity, conservation, and utilization of plant genetic resources. *Genes (Basel).* 2023;14(1):174. doi: 10.3390/genes14010174.
5. Martínez-Fortún J, Phillips D, Jones H. Natural and artificial sources of genetic variation used in crop breeding: A baseline comparator for genome editing. *Front Genome Ed.* 2022;4:937853. doi: 10.3389/fgeed.2022.937853.
6. Garland S, Curry H. Turning promise into practice: Crop biotechnology for increasing genetic diversity and climate resilience. *PLoS Biol.* 2022;20(7):e3001716. doi: 10.1371/journal.pbio.3001716.
7. Begna T, Tereza T. Genetic variability and its benefits in crop improvement: A review. *Middle East J Agric Res.* 2024;13(1):128-136. doi: 10.36632/mejar/2024.13.1.6.

8. Ma L, Kong F, Sun K, Wang T, Guo T. From classical radiation to modern radiation: past, present, and future of radiation mutation breeding. *Front Public Health*. 2021;9:768071. doi: 10.3389/fpubh.2021.768071.
9. Bharat R, Prathmesh S, Sarsu F, Suprasanna P. Induced mutagenesis using gamma rays: biological features and applications in crop improvement. *OBM Genet*. 2024;8(2):1-27. doi: 10.21926/obm.genet.2402233.
10. Wang Y, Zafar N, Ali Q, Manghwar H, Wang G, Yu L, Ding X, Ding F, Hong N, Wang G. CRISPR/Cas genome editing technologies for plant improvement against biotic and abiotic stresses: advances, limitations, and future perspectives. *Cells*. 2022;11:3928. doi: 10.3390/cells11233928.
11. Ghanim A. Physical Mutagenesis in Cereal Crops. In: Ghanim A, Sivasankar S, Rich P, editors. *Mutation breeding and efficiency enhancing technologies for resistance to striga in cereals*. Berlin: Springer; 2023. p. 13-27. doi: 10.1007/978-3-662-68181-7_2.
12. Dhole V, Jegadeesan S, Punniyamoorthy D. Use of gamma rays in crop improvement. In: Kumar N, editor. *Plant mutagenesis. Sustainable Landscape Planning and Natural Resources Management*. Cham: Springer; 2024. p. 135-157. doi: 10.1007/978-3-031-50729-8_11.
13. Gupta S, Datta A, Pramanik A, Biswas J, Karmakar R. X-ray and gamma irradiation induced chromosomal aberrations in plant species as the consequence of induced mutagenesis-an overview. *Plant Arch*. 2019;19(2):1973-1979. Available at: [http://www.plantarchives.org/19-2/1973-1979%20\(5366\).pdf](http://www.plantarchives.org/19-2/1973-1979%20(5366).pdf)
14. Panneerselvam N, Kathiravan V. Physical and chemical agents induced structural and numerical changes. In: Khan A, editor. *Mutagenesis, cytotoxicity and crop improvement: Revolutionizing food science*. 2021. p. 325-362.
15. Geras'kin S, Bondarenko E, Bitarishvili S. Application of ionizing radiation for crop improvement. *Planta*. 2025;262(3):1-17. doi: 10.1007/s00425-025-04796-w.
16. Singer S, Laurie J, Bilichak A, Kumar S, Singh J. Genetic variation and unintended risk in the context of old and new breeding techniques. *Crit Rev Plant Sci*. 2021;40(1):68-108. doi: 10.1080/07352689.2021.1883826.
17. Duarte G, Volkova P, Fiengo Perez F, Horemans N. Chronic ionizing radiation of plants: An evolutionary factor from direct damage to non-target effects. *Plants (Basel)*. 2023;12(5):1178. doi: 10.3390/plants12051178.
18. Miller V, Beying N, Schmidt C, Puchta H. Double strand break (DSB) repair pathways in plants and their application in genome engineering. In: Willmann MR, editor. *Genome editing for*

- precision crop breeding. Burleigh Dodds Science Publishing; 2021. p. 27-61. doi: 10.1201/9781003048237.
19. Raina A, Sahu PK, Laskar R, Rajora N, Sao R, Khan S, et al. Mechanisms of genome maintenance in plants: Playing it safe with breaks and bumps. *Front Genet.* 2021;12:675686. doi: 10.3389/fgene.2021.675686.
 20. Shen H, Li Z. DNA double-strand break repairs and their application in plant DNA integration. *Genes (Basel).* 2022;13(2):322. doi: 10.3390/genes13020322.
 21. Szurman-Zubrzycka M, Jędrzejek P, Szarejko I. How do plants cope with DNA damage? A concise review on the DDR pathway in plants. *Int J Mol Sci.* 2023;24(3):2404. doi: 10.3390/ijms24032404.
 22. Ibáñez B, Melero A, Montoro A, San Onofre N, Soriano J. Molecular insights into radiation effects and protective mechanisms: a focus on cellular damage and radioprotectors. *Curr Issues Mol Biol.* 2024;46(11):12718. doi: 10.3390/cimb46110755.
 23. Mir S, Faheem M, Sial M, Ullah G, Leghari K. Mutagenesis: exploring genetic diversity of industrial crop plants. In: Kumar N, editor. *Industrial Crop Plants.* Singapore: Springer Nature; 2024. p. 73-100. doi: 10.1007/978-981-97-1003-4_3.
 24. Poetsch A. The genomics of oxidative DNA damage, repair, and resulting mutagenesis. *Comput Struct Biotechnol J.* 2020;18:207-219. doi: 10.1016/j.csbj.2019.12.013.
 25. Goodhead D, Weinfeld M. Clustered DNA damage and its complexity: Tracking the history. *Radiat Res.* 2024;202(2):385-407. doi: 10.1667/RADE-24-00017.1.
 26. EFSA Panel on Genetically Modified Organisms (GMO), Mullins E, Bresson JL, Dalmay T, Dewhurst IC, Epstein MM, Rostoks N, et al. In vivo and in vitro random mutagenesis techniques in plants. *EFSA J.* 2021;19(11):e06611. doi: 10.2903/j.efsa.2021.6611.
 27. Grin I, Petrova D, Endutkin A, Ma C, Yu B, Li H, et al. Base excision DNA repair in plants: Arabidopsis and beyond. *Int J Mol Sci.* 2023;24(19):14746. doi: 10.3390/ijms241914746.
 28. Cornforth M, Bedford J, Bailey S. Destabilizing effects of ionizing radiation on chromosomes: sizing up the damage. *Cytogenet Genome Res.* 2021;161(6-7):328-351. doi: 10.1159/000516523.
 29. Zhao L, Bao C, Shang Y, He X, Ma C, Lei X, et al. The determinant of DNA repair pathway choices in ionising radiation-induced DNA double-strand breaks. *BioMed Res Int.* 2020;4834965. doi: 10.1155/2020/4834965.
 30. Guo X, Ren J, Zhou X, Zhang M, Lei C, Chai R, et al. Strategies to improve the efficiency and quality of mutant breeding using heavy-ion beam irradiation. *Crit Rev Biotechnol.* 2024;44(5):735-752. doi: 10.1080/07388551.2023.2226339.

31. Vogt A, He Y. Structure and mechanism in non-homologous end joining. *DNA Repair (Amst)*. 2023;130:103547. doi: 10.1016/j.dnarep.2023.103547.
32. Van de Kamp G, Heemskerk T, Kanaar R, Essers J. DNA double strand break repair pathways in response to different types of ionizing radiation. *Front Genet*. 2021;12:738230. doi: 10.3389/fgene.2021.738230.
33. Verma P, Tandon R, Yadav G, Gaur V. Structural aspects of DNA repair and recombination in crop improvement. *Front Genet*. 2020;11:574549. doi: 10.3389/fgene.2020.574549.
34. Dhar M, Koul A. Plant cytogenetics in the era of genome editing. *Nucleus*. 2024;67(3):595-609. doi: 10.1007/s13237-024-00524-z.
35. Raabe K, Sun L, Schindfessel C, Honys D, Geelen D. A word of caution: T-DNA-associated mutagenesis in plant reproduction research. *J Exp Bot*. 2024;75(11):3248-3258. doi: 10.1093/jxb/erae114.
36. Tuncel A, Pan C, Clem J, Liu D, Qi Y. CRISPR–Cas applications in agriculture and plant research. *Nat Rev Mol Cell Biol*. 2025;26:419-441. doi: 10.1038/s41580-025-00834-3.
37. Liu Y, Liu Q, Yi C, Liu C, Shi Q, Wang M, et al. Past innovations and future possibilities in plant chromosome engineering. *Plant Biotechnol J*. 2025;23(3):695-708. doi: 10.1111/pbi.14530.
38. Sharma V, Thakur M, Maan S, Verma K, Thakur A, Penna S. In vitro mutagenesis: a non-invasive technology for effective crop improvement to assure food and nutritional security—current trends, advancements and future perspectives. *J Plant Growth Regul*. 2025;44(2):484-507. doi: 10.1007/s00344-024-11484-8.
39. Penna S, Shirani Bidabadi S, Jain SM. Mutation breeding to promote sustainable agriculture and food security in the era of climate change. In: Penna S, Jain SM, editors. *Mutation breeding for sustainable food production and climate resilience*. Singapore: Springer Nature; 2023. p. 1-23. doi: 10.1007/978-981-16-9720-3_1.
40. Pathirana R. Mutations in plant evolution, crop domestication and breeding. *Trop Agric Res Ext*. 2021;24(3). doi: 10.4038/tare.v24i3.5551.
41. Manjaya J, Gupta S. Mutation breeding for adaptation to climate change in seed propagated crops. In: Raina A, Wani M, Laskar R, Tomlekova N, Khan S, editors. *Advanced Crop Improvement*. Vol. 2. Cham: Springer; 2023. p. 197-229. doi: 10.1007/978-3-031-26669-0_8.
42. Animasaun D, Oguntoye E. Mutagenesis in crop improvement: methods and applications. *J Crop Improv*. 2024;38(3):156-178. doi: 10.1080/15427528.2024.2336257.
43. Kaur G, Chhabra G, Praba UP, Singh R, Kaur S, Kaur J, et al. Mutagenesis in plant tissue culture. In: Kumar N, editor. *Plant mutagenesis and crop improvement*. Boca Raton: CRC Press; 2024. p. 180-206. doi: 10.1201/9781003392897.

44. Bhattacharya A, Parkhi V, Palan B, Char B. Mutagenesis and TILLING in the era of precise genome editing. In: Bhattacharya A, Parkhi V, Char B, editors. TILLING and Eco-TILLING for crop improvement. Singapore: Springer; 2023. p. 1-34. doi: 10.1007/978-981-99-2722-7_1.
45. Adhikari B, Roy A, Reddy H, Roy D, Das C, Bhattacharyya S, et al. Identification and analysis of gamma-irradiation-induced Stemphylium blight tolerant lentil (*Lens culinaris*) mutant. Int J Radiat Biol. 2024;100(12):1722-1730. doi: 10.1080/09553002.2024.2409667.
46. Khah M, Mir R, Alam Q. Induced mutation technology towards improving stress resilience in plants. In: Improving stress resilience in plants. Academic Press; 2024. p. 389-409. doi: 10.1016/B978-0-443-18927-2.00030-3.
47. Mohsen G, Soliman S, Mahgoub E, Ismail T, Mansour E, Alwutayd K, et al. Gamma-rays induced mutations increase soybean oil and protein contents. PeerJ. 2023;11:e16395. doi: 10.7717/peerj.16395.
48. Sao R, Sahu P, Patel R, Das B, Jankuloski L, Sharma D. Genetic improvement in plant architecture, maturity duration and agronomic traits of three traditional rice landraces through gamma ray-based induced mutagenesis. Plants (Basel). 2022;11(24):3448. doi: 10.3390/plants11243448.
49. Kuo W, Chung C, Juang K, Tung CW, Liu LyD. Challenges to agriculture production under climate change. In: Hussain N, Hung C, Wang L, editors. Agricultural nutrient pollution and climate change. Cham: Springer; 2025. p. 29-56. doi: 10.1007/978-3-031-80912-5_2.
50. Iqbal B, Alabbosh K, Jalal A, Suboktagin S, Elboughdiri N. Sustainable food systems transformation in the face of climate change: strategies, challenges, and policy implications. Food Sci Biotechnol. 2025;34(4):871-883. doi: 10.1007/s10068-024-01712-y.
51. Maan S, Sharma V, Brar J. Improvement of fruit crops through Radiation-Induced Mutations Facing Climate Change. In: Penna S, Jain SM, editors. Mutation breeding for sustainable food production and climate resilience. Singapore: Springer; 2023. p. 693-718. doi: 10.1007/978-981-16-9720-3_23.
52. Chakraborty N, Kant A, Debnath S. Application of nuclear techniques in crop improvement: a review. In: Kumar N, editor. Plant mutagenesis and crop improvement. Boca Ratón: CRC Press; 2024. p. 98-123. doi: 10.1201/9781003392897.
53. Bhardwaj S, Gautam N, Gautam Y, Mishra R. Role of mutation breeding in crop improvement. In: Kumar M, Mishra R, editors. Recent advances in plant breeding. Sharjah: Bentham Science Publishers; 2024. p. 46-61. doi: 10.37446/volbook102024/46-61.

54. Cabusora C, Desamero N, Chico M, Ticman H, Bagarra J, Valida G, et al. New multiple abiotic stress tolerant rice variety developed from combining tissue culture and gamma irradiation. *Philipp J Sci.* 2024;153(S1):46-61.
55. Bakiruly K, Zhalbyrov A, Kruglyak A, Aleksiyaynak Y, Baimbetova G, Yershin Z, et al. Creation of salinity and drought resistant mutant rice forms by ionizing radiation (gamma and neutron radiation). 2023. doi: 10.20944/preprints202304.0590.v1.
56. Watson-Guido W, Arrieta-Espinoza G, Araya-Valverde E, Gatica-Arias A. Salinity stress effects on morphological traits and salt-responsive gene expression in gamma-irradiated rice mutant lines (*Oryza sativa* L. var. *indica*). *Plant Cell Tiss Organ Cult.* 2025;162(2):1-13. doi: 10.1007/s11240-025-03148-6.
57. Ray B, Nath U, Azad M. Mutagenesis for the development of submergence tolerance rice genotypes in Indica by gamma irradiation-induced mutation using ^{60}Co source isotope with marker assay. *Int J Agric Environ Bioresearch.* 2022;7(3). doi: 10.35410/IJAEB.2022.5723.
58. Ilyas M, Hameed A, Shah T. Field and biochemical evaluation of glyphosate tolerant chickpea (*Cicer arietinum* L.) mutants developed through induced mutagenesis. *BMC Plant Biol.* 2024;24(1):1028. doi: 10.1186/s12870-024-05733-x.
59. Costa T, Santos M, de Souza Junior L, Brito D, de Jesus Rocha A, Lino L, et al. Gamma radiation-induced mutagenesis in the development of Cavendish subgroup banana cultivars resistant to *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense*. *Euphytica.* 2025;221(9):147. doi: 10.1007/s10681-025-03595-4.
60. Purba D, Husni A, Akhidaya A, Kosmiatin M, Purwito A. Effect of gamma ray irradiation and in vitro selection on "Siem Banyuwangi" (*Citrus nobilis* (L)) to Huanglongbing disease. *Agrivita.* 2021;43(2):358. doi: 10.17503/agrivita.v43i2.2887.
61. Xu H, Halford N, Guo G, Chen Z, Li Y, Zhou L, et al. Transcriptomic and metabolomic analyses reveal the importance of lipid metabolism and photosynthesis regulation in high salinity tolerance in barley (*Hordeum vulgare* L.) leaves derived from mutagenesis combined with microspore culture. *Int J Mol Sci.* 2023;24(23):16757. doi: 10.3390/ijms242316757.
62. Zhang Y, Wang H, Du Y, Zhang L, Li X, Guo H, et al. Biological responses of an elite centipedegrass (*Eremochloa ophiuroides* (Munro) Hack.) cultivar (Ganbei) to carbon ion beam irradiation. *Front Plant Sci.* 2024;15:1433121. doi: 10.3389/fpls.2024.1433121.
63. Ragini R, Murukan N, Sekhon NK, Chugh C, Agarwal P, Yadav P, et al. Breaking the association between gametocidal gene(s) and leaf rust resistance gene (LrS2427) in *Triticum aestivum*-*Aegilops speltoides* derivative by gamma irradiation. *Mol Breed.* 2024;44:54. doi: 10.1007/s11032-024-01491-8.

64. Murugan G, Kishore B, Murugasamy S, Paramasivan J, Vishwakarma G, Shaligram A, et al. Phenotypic and genotypic characterization of electron beam treated inter-specific (*Triticum dicoccum* Schrank X *Triticum carthlicum* Nevski) lines of emmer wheat for leaf rust and stem rust resistance. *Int J Radiat Biol.* 2025;101(6):614-625. doi: 10.1080/09553002.2025.2494547.
65. Rani M, Hasibuzzaman A, Begum S. Development of genetically diverse breeding lines through induced mutagenesis for the improvement of Chinigura and Kataribhog aromatic rice (*Oryza sativa* L.) landraces. *Int J Radiat Biol.* 2025;101(7):761-774. doi: 10.1080/09553002.2025.2498982.
66. Al-Sayed W, El-Shazly H, El-Nahas A, Omran A. Cytogenetic impact of gamma radiation and its effects on growth, yield and drought tolerance of maize (*Zea mays* L.). *BMC Plant Biol.* 2025;25(1):141. doi: 10.1186/s12870-025-06111-x.
67. Shaebani A, Norouzian M, Behgar M, Borzouei A, Karimzadeh H. Evaluating the role of gamma irradiation to ameliorate salt stress in corn. *Int J Radiat Biol.* 2023;99(3):523-533. doi: 10.1080/09553002.2022.2110302.
68. Atak Ç, Çelik Ö, Gümüş T, Meric S, Ayan A, Erdoğan M. Physiological characterization and assessment of genetic variability, yield, and quality properties of gamma-ray-induced salinity tolerant soybean (*Glycine max* (L.) Merrill) mutants. *J Appl Bot Food Qual.* 2024;97:140 doi: 10.5073/jabfq.2024.097.017.
69. Samudio-Oggero A, Romero G, Vergara W, Alvarenga O, Núñez J, Tórres B, et al. Determination of the method of induction of mutations by gamma radiation in soybeans (*Glycine max* L. Merrill) for tolerance to carbonic rot produced by the fungus *Macrophomina phaseolina* (Tassi Goid.). *MethodsX.* 2025;14:103251. doi: 10.1016/j.mex.2025.103251.
70. Kara A, Arici Ş. Determination of gamma rays efficiency against *Rhizoctonia solani* in potatoes. *Open Chem.* 2019;17(1):254-259. doi: 10.1515/chem-2019-0033.
71. Haque M, Miah M, Hasna M, Afroge M, Akhter S, Babu R. Enhancing potato productivity in Bangladesh: gamma irradiation-induced resistance to bacterial wilt caused by *Ralstonia solanacearum*. *Bangladesh J Nucl Agric.* 2025;39(1):101-113. doi: 10.3329/bjnag.v39i1.83341.
72. Baguma J, Ogwok E, Elegba W, Sarkodie A, Otu S, Apio H, et al. Effects of gamma irradiation and ethyl methane sulphonate on morphometric traits and prevalence of common viral diseases and whiteflies in cassava. *Afr Crop Sci J.* 2021;29(3):355-371. doi: 10.4314/acsj.v29i3.3.
73. Hartati R, Suhesti S, Wulandari S, Ardana I, Yunita R. In-vitro selection of sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) putative mutant for drought stress. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.* IOP Publishing; 2021. Vol. 653. p. 012135. doi: 10.1088/1755-1315/653/1/012135.

74. Diallo S, Badiane F, Diédhiou I, Diouf M, Ngom M, Diouf D. Development of cowpea (*Vigna unguiculata*) mutant lines for dissecting resilience to drought through physiological and molecular crosstalk analysis. *Plant Mol Biol Rep.* 2025;43(2):428-446. doi: 10.1007/s11105-024-01473-2.
75. Hafeez A, Ali B, Javed M, Saleem A, Fatima M, Fathi A, et al. Plant breeding for harmony between sustainable agriculture, the environment, and global food security: an era of genomics-assisted breeding. *Planta.* 2023;258(5):97. doi: 10.1007/s00425-023-04252-7.
76. Paniza H. Challenges in plant breeding under climate change: a review. In: Abd-Elsalam K, Abdel-Momen S, editors. *Plant quarantine challenges under climate change anxiety.* Cham: Springer; 2024. p. 533–556. doi: 10.1007/978-3-031-56011-8_17.
77. Peter M, Uko S, Ahmad H, Babarabi A. The role of mutagenesis in global food security. *LJSIR Book Series.* Vol. 1. 2025. p. 62. doi: 10.62050/ljsir2025.book.v1.
78. Shabani M, Alemzadeh A, Nakhoda B, Razi H, Houshmandpanah Z, Hildebrand D. Optimized gamma radiation produces physiological and morphological changes that improve seed yield in wheat. *Physiol Mol Biol Plants.* 2022;28(8):1571-1586. doi: 10.1007/s12298-022-01225-0.
79. Aly A, Eliwa N, Abd El-Megid M, Maraei R. Impact of low-doses gamma radiation on phytochemicals and bioactive compounds in barley microgreens. *Int J Radiat Biol.* 2025;101(7):730-741. doi: 10.1080/09553002.2025.2494613.
80. Chauhan A, Checker R, Sahu P, Patel R, Baghel S, Sharma D, et al. Agronomic improvement using gamma ray induced mutagenesis is associated with changes in phytochemical and phytohormonal profiles in functional rice variety ‘Gathuwan’. *BMC Plant Biol.* 2025;25(1):1069. doi: 10.1186/s12870-025-07036-1.
81. Siddiqui M, Khan MT, Nizamani GS, Yasmeen S, Khan I, Khatri A, et al. Field evaluation of high yielding genotypes of lentil (*Lens culinaris* medik.) developed through induced mutagenesis. *Pakistan J Agric Res.* 2020;33(1):164-169. doi: 10.17582/journal.pjar/2020/33.1.164.169.
82. Mesbahi H, Saibari I, Ezziyyani M, Hamim A. The role of gamma irradiation to induce genetic variability and improve the yield of groundnut (*Arachis hypogaea* L). *Arab J Basic Appl Sci.* 2025;32(1):103-110. doi: 10.1080/25765299.2025.2500143.
83. Kamal M. Mutagenic effect of gamma rays on biochemical and yield-related traits in Chickpea. *J Agric Food Sci Biotechnol.* 2024;2(3):290-301. doi: 10.58985/jafsb.2024.v02i03.59.
84. Yu H, Zhang Y, Li H, Feng H. Mutagenesis of Highland barley (*Hordeum vulgare* L. Var. nudum) using nitrogen ion beam implantation: screening of phenotypic variations and comparative transcriptome analysis. *BMC Genomics.* 2025;26(1):681. doi: 10.1186/s12864-025-11856-8.

85. Mbah E. Improvement of growth, yield and nutritional status of maize (*Zea mays* L.) through X-ray bombardment of seed. *Field Veg Crops Res/Ratarstvo Povrtarstvo*. 2022;59(3):91-103. doi: 10.5937/ratpov59-38811.
86. Musitia V, Ayua E, Kinyua M, Kamau H. Characterization of physicochemical and functional properties of selected Irish potato varieties developed through gamma irradiation. *Sci Prog*. 2025;108(2). doi: 10.1177/00368504251336298.
87. Purankar M, Nikam A, Devarumath R, Penna S. Radiation induced mutagenesis, physio-biochemical profiling and field evaluation of mutants in sugarcane cv. CoM 0265. *Int J Radiat Biol*. 2022;98(7):1261-1276. doi: 10.1080/09553002.2022.2024291.
88. Nandariyah N, Yuniastuti E, Sukaya S, Yudhita S. Selection for growth traits on M1V1 generation of Raja Bulu Banana (*Musa paradisiaca* Linn.) obtained by gamma rays irradiation. *Caraka Tani J Sustain Agric*. 2021;36(1):97-109. doi: 10.20961/carakatani.v36i1.34492.
89. Dada K, Animasaun D, Mustapha O, Bado S, Foster B. Radiosensitivity and biological effects of gamma and X-rays on germination and seedling vigour of three *Coffea arabica* varieties. *J Plant Growth Regul*. 2023;42(3):1582-1591. doi: 10.1007/s00344-022-10643-z.
90. Kantoğlu K, İç E, Özmen D, Bulut F, Ergun E, Kantoğlu Ö, et al. Gamma rays induced enhancement in the phytonutrient capacities of tomato (*Solanum Lycopersicum* L.). *Front Hortic*. 2023;2:1190145. doi: 10.3389/fhort.2023.1190145.
91. Hilioti Z, Antunes D, Kalaitzis P, Merkouropoulos G. Manipulation of plant architecture for crop production. *Front Plant Sci*. 2024;15:1502833. doi: 10.3389/fpls.2024.1502833.
92. Singh H, Kumar N, Kumar A. Enhancing resource use efficiency in crops through plant functional traits. In: Kumar N, Singh H, editors. *Plant functional traits for improving productivity*. Singapore: Springer; 2024. doi: 10.1007/978-981-97-1510-7_6.
93. Gupta S, Sharma N. Application of mutagenesis in the improvement of industrial crops. In: Kumar N, editor. *Industrial crops improvement. Sustainable Landscape Planning and Natural Resources Management*. Cham: Springer; 2025. doi: 10.1007/978-3-031-75937-6_3.
94. Kantoğlu K, Peşkircioğlu H, Ellialtıglu Ş, Kökpınar Ş. Radiation-Induced mutation for drought tolerance in vegetables. In: Chaudhry U, Öztürk Z, Gökçe A, editors. *Drought Stress*. Cham: Springer; 2025. doi: 10.1007/978-3-031-80610-0_15.
95. Guo W, Chen L, Herrera-Estrella L, Cao D, Tran L. Altering plant architecture to improve performance and resistance. *Trends Plant Sci*. 2020;25(11):1154-1170. doi: 10.1016/j.tplants.2020.05.009.

96. Elsherbiny H, Gaballah M, Hamad H, Sakr S, Elbadawy O, Alwutayd K, et al. Inducing potential mutants in rice using different doses of gamma rays for improving agronomic traits. *Chil J Agric Res.* 2024;84(3):380-390. doi: 10.4067/S0718-58392024000300380.
97. Ramchander S, Andrew-Peter-Leon M, Khan Y, Souframanien J, Arumugam M. Molecular and physiological characterization of early semi-dwarf mutants of rice and localization of SNP variants in Sd1 locus generated through gamma radiation. *Int J Radiat Biol.* 2024;100(4):650-662. doi: 10.1080/09553002.2024.2304827.
98. Ergün N, Akdogan G, İkinçikarakaya S. Impact of gamma radiation on the agronomic properties of naked barley genotypes. *Int J Agric Environ Food Sci.* 2023;7(3):650-659. doi: 10.31015/jaefs.2023.3.19.
99. Bilgin O, Sarier S, Başer İ, Balkan A. Enhancement of androgenesis and plant regeneration from wheat anther culture by seed pre-sowing gamma irradiation. *Tekirdağ Ziraat Fakültesi Dergisi.* 2022;19(2):354-365. doi: 10.33462/jotaf.993270.
100. Zhao Z, Liu Z, Zhou Y, Wang J, Zhang Y, Yu X, et al. Creation of cotton mutant library based on linear electron accelerator radiation mutation. *Biochem Biophys Rep.* 2022;30:101228. doi: 10.1016/j.bbrep.2022.101228.
101. Hashim A, Rafii M, Yusuff O, Harun A, Juraimi S, Misran A, et al. Genetic consequences of chronic gamma irradiation on agro morphological traits in chili under hydrogel enhance media. *Heliyon.* 2024;10(4):e25111. doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e25111.
102. Pramanik B, Debnath S, Rahimi M, Helal M, Hasan R. Morphometric frequency and spectrum of gamma-ray-induced chlorophyll mutants identified by phenotype and development of novel variants in lentil (*Lens culinaris* Medik.). *PLoS One.* 2023;18(6):e0286975. doi: 10.1371/journal.pone.0286975.
103. Hafsa M, Mohammed E, Ahlem H, Ahlam H. Study of the effect of gamma irradiation on morpho-physiological parameters and germination of peanut seeds (*Arachis Hypogaea* L.) in fifth generation “M5” hybrids. In: Ezziyyani M, Kacprzyk J, Balas VE, editors. *International conference on advanced intelligent systems for sustainable development.* Vol. 1402. Cham: Springer; 2024. p. 758-765. doi: 10.1007/978-3-031-91334-1_67.
104. Perveen N, Dinesh M, Sankaran M, Bindu K, Shivashankara K, Ravishankar K, et al. Radiation induced mutations alter morpho-biochemical, anatomical and molecular responses in polyembryonic mango genotype Bappakkai. *Plant Physiol Rep.* 2025;30(2):284-295. doi: 10.1007/s40502-025-00860-5.
105. Hasim A, Shamsiah A, Hussein S. Induced mutations using gamma ray and multiplication of plantlet through micro cross section culture of banana (*Musa acuminata* cv. Berangan). In: IOP

conference series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing; 2021. Vol. 757. p. 012007.
doi: 10.1088/1755-1315/757/1/012007.

106. Avendaño-Arrazate CH, Gómez-Simuta Y, Martínez-Bolaños M, Méndez-López I, Ortíz-Curiel S, Ariza-Flores R, et al. Gamma radiation of ^{60}Co on morphological and reproductive characteristics of M1 plants in *Coffea arabica* L. *Ecosist Recur Agropecuarios*. 2021;8(1). doi: 10.19136/era.a8n1.2730.

Received: [25 noviembre 2025] **Accepted:** [24 enero 2025] **Published:** [15 marzo 2026]

Citation: Martin-Vargas, D; Andrade, M; Quintero, A. Physical mutagenesis: a platform for genomic plasticity and genetic variability in crops of agronomic interest. *Bionatura*. 2026. Volumen 11, No 1.

<https://doi.org/10.70373/RB/2026.11.01.1>

Peer review information: Bionatura thanks the anonymous reviewers for their contribution to the peer review of this work using <https://reviewerlocator.webofscience.com/>

All articles published by Bionatura Journal are freely and permanently accessible online immediately after publication, without subscription charges or registration barriers.

Publisher's Note: Bionatura stays neutral concerning jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



REISHI (*Ganoderma lucidum*)

Full Spectrum Extract

- **Relajación y recarga**
- Sistema inmunológico
- Salud cardiovascular.
- Apoya la energía y la resistencia.
- Antiestrés.

CONTACTO: Dr. Julio Pineda Insuasti, PhD.
info.biodiversity@gmail.com
Cel. +593 99 758 9267, Ibarra-Ecuador

SCIENTIFIC PARTNER: <https://cebaecuador.org/>
inf.ceba@gmail.com, Cel + 593 99 579 7813. Ibarra-Ecuador
21/11/2025



Artículo Revisión

Algunas consideraciones de la fotografía digital del iris para confección estética de prótesis ocular

Some considerations of the digital photography of the iris for esthetic confection of ocular prosthesis

Dra. Ana María Nápoles Salas.^{1*} ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1071-6208>

Dr.C Isidro de Jesús Nápoles González.² <https://orcid.org/0000-0002-4365-3162>

Dr.C Silvia María Díaz Gómez.³ <https://orcid.org/0000-0002-6314-3434>

Dr.C Alfredo Álvarez Rivero.⁴ <https://orcid.org/0000-0002-8773-911X>

Dra. Tania Victoria Puerto Pérez.⁵ <https://orcid.org/0000-0003-2873-8413>

Dr. German Antonio Guilarte León.⁶ <https://orcid.org/0000-0002-9848-524X>

¹ Profesor Instructor. Universidad de Ciencias Médicas. Policlínico Universitario “Julio Antonio Mella.” Camagüey. Cuba. aurora.cmw@infomed.sld.cu

² Profesor Auxiliar. Universidad de Ciencias Médicas. Policlínico Universitario “Julio Antonio Mella.” Camagüey. Cuba. isidro.cmw@infomed.sld.cu

³ Profesor Titular. Universidad de Ciencias Médicas. Clínica Estomatológica Docente Ismael Clark. Camagüey. Cuba. msilvia.cmw@infomed.sld.cu

⁴ Profesor Titular. Universidad de Ciencias Médicas. Centro de Investigaciones Médico-Quirúrgicas. La Habana. Cuba. ralvarez@infomed.sld.cu

⁵ Profesor Asistente. Universidad de Ciencias Médicas. Departamento Informática Médica. Camagüey. Cuba. taniapp.cmw@infomed.sld.cu

⁶ Profesor Asistente. Universidad de Ciencias Médicas. Hospital Militar Clínico Quirúrgico Docente “Dr. Octavio de la Concepción y de la Pedraja”. Camagüey. Cuba. gerantony1983@nauta.com.cu

* Autor para la correspondencia: Dra. Ana María Nápoles Salas. aurora.cmw@infomed.sld.cu

<https://doi.org/10.70373/RB/2026.11.01.2>

RESUMEN

La rehabilitación protésica de los defectos oculares es una miscelánea de ciencia, tecnología y arte, que impone un patrón basado en la experiencia del profesional y el conocimiento de los estándares estéticos.

Hacer coincidir estos dispositivos protésicos con el ojo sano en forma y color es desafiante para los profesionales, principalmente en la reproducción realista del iris humano. Este artículo de revisión

analiza los aspectos relacionados en la toma de imagen digital del iris para la confección estética de prótesis ocular. Mediante una metodología interdisciplinaria, se revisaron 88 estudios para recopilar información científica del tema a través de una búsqueda exhaustiva de artículos científicos publicados en las bases de datos electrónicas PubMed, Scopus, SciELO y buscadores como Google desde enero de 2013 hasta diciembre del 2025. Se seleccionaron 27 artículos. Los hallazgos revelan que la toma de imagen digital del iris, en la rehabilitación protésica ocular permite realizar una reproducción fiel de las características del ojo sano, con resultados faciales adecuados. Es importante elegir un equipo fotográfico con alta resolución. Estas imágenes digitales tienen la ventaja que pueden ser documentadas, incluyendo la fecha, el nombre del paciente y cualquier información relevante asociada con la imagen que permite consultarse si se requiere el remplazo de una prótesis.

Palabras clave: imagen digital: fotografía en prótesis ocular: confección de iris.

ABSTRACT

The prosthetic rehabilitation of the ocular defects is a miscellany of science, technology and art, that he imposes a pattern based in the experience of the professional and the knowledge of the esthetic standards.

Matching up these prosthetic devices with the healthy eye in good shape and color is challenging for the professionals, principally in the realistic reproduction of the human iris. This article of revision parses the aspects related in the photo of digital image of the iris for the esthetic confection of ocular prosthesis. By means of an interdisciplinary methodology, PubMed, Scopus, SciELO and seekers checked 88 education to compile scientific information of the theme through an exhaustive search of scientific goods published in the electronic data bases like Google since January 2013 to Dicember 2025. They selected 27 articles. Findings reveal that the photo of digital image of the iris, in the prosthetic ocular rehabilitation allows accomplishing an accurate reproduction of the characteristics of the healthy eye, with facial adequate results. It is important to elect a photo equipment with high resolution. These digital images have the advantage that can be well-informed, including the date, the patient's name and any relevant information associated with with the image that he allows consulting each other if replacement of a prosthesis is required.

Keywords: digital image; ocular prosthesis photography; iris making.

INTRODUCCIÓN

La belleza es una percepción subjetiva influenciada por numerosos factores de la sociedad e interpersonales, es decir, cada persona tiene su propio concepto de lo bello. Es un concepto individual que determina la forma de mirar, concebir, juzgar y de razonar frente al mundo que los rodea y en la actualidad la apariencia es una de las principales preocupaciones del ser humano, por consiguiente, cualquier defecto maxilofacial como la pérdida ocular que impida al individuo llevar una vida normal, debe ser tratado con prioridad por el compromiso estético y psicosocial que esto implica.^(1,2)

Los defectos oculares son producidos por causas traumáticas, neoplásicas, congénitas y por enfermedades adquiridas. Es una discapacidad visual que se caracteriza por la ausencia del globo ocular o la disminución del volumen de este debido a la atrofia de los tejidos con disminución del humor acuoso (tisis bulbi).^(3,4)

La rehabilitación protésica de los defectos oculares es una miscelánea de ciencia, tecnología y arte, que impone un patrón basado en la experiencia del profesional y el conocimiento de los estándares estéticos. La prótesis ocular es un procedimiento técnico que crea la ilusión de un ojo sano y normal, así como del tejido periférico, esto hace posible una adaptación estética y funcional exitosa, traducida en un dispositivo que simula la anatomía exacta del órgano, para lo cual se necesita prestar especial atención a la reproducción exacta del color, el contorno y el tamaño, lo que proporcionará una apariencia realista y simétrica.^(1,5,6)

La confección de estas prótesis es un proceso delicado, que emplea técnicas perfeccionadas a lo largo de los siglos y materiales biocompatibles como el polimetilmetacrilato, utilizado por su transparencia, estabilidad química al calor y notables propiedades ante el envejecimiento. Hacer coincidir estos dispositivos protésicos con el ojo sano en forma y color es desafiante para los profesionales, principalmente en la reproducción realista del iris humano, con su textura pigmentada y estratificada, con criptas y pliegues, resulta particularmente compleja.^(7,8)

Estas características son difíciles de lograr mediante la producción convencional de una prótesis de polimetilmetacrilato, donde el método más común de reproducción del iris, consiste en aplicar a mano varias capas de pintura semitransparentes de óleo. El uso continuado de esta técnica se debe a su facilidad de adaptación y al control preciso del color final mediante la mezcla de colores, pero tiene como desventaja que depende en parte de la destreza y gran habilidad artística del profesional.^(7,9)

Se han probado otros métodos, como la mezcla de monómeros y polímeros sobre un iris artificial, una técnica de pintura invertida con capuchones prefabricados y la reproducción fotográfica del iris sano del paciente. Además, se han diseñado y desarrollados ojos artificiales impresos digitalmente, y

proceso de impresión de transferencia por sublimación para la creación de prótesis oculares tridimensionales.^(9,10,11,12)

El propósito de este trabajo es describir la secuencia clínica en la toma de imagen del iris para la confección estética de prótesis ocular.

MÉTODOS

Método de recolección de datos: Los autores realizaron una revisión bibliográfica analítica para recopilar la información científica del tema a partir de diversos materiales bibliográficos que permitieron la elaboración de la secuencia clínica.

Estrategia de búsqueda y criterios de elección: Se realizó una búsqueda exhaustiva de artículos científicos publicados en las bases de datos electrónicas PubMed, Medline, Scopus, SciELO, Cochrane y buscadores como Google desde enero de 2013 hasta diciembre de 2025. Se trató de un análisis documental sobre procedimientos de imagen digital, fotografía en prótesis ocular, confección de iris, pacientes con defectos oculares, rehabilitación protésica ocular, prótesis bucomaxilofacial y ocular, así como, los fundamentos científico-teóricos que permitieron plantear los aspectos fundamentales en la creación de la secuencia clínica de la fotografía digital del iris en la confección estética de prótesis ocular.

Los artículos relacionados con el tema cumplieron con los siguientes criterios de inclusión:

- Libros de textos, tesis y artículos científicos disponibles en internet e impresos sin restricciones idiomáticas.
- Documentos disponibles a texto completo.
- Material y métodos que refleje:
 - a) Procederes de atención protésica al paciente con defecto bocomaxilofaciales.
 - b) Rehabilitación protésica a paciente con defecto ocular.

Criterios de exclusión: Power point y resúmenes.

Universo de investigaciones: Se revisaron 88 investigaciones y artículos científicos.

Muestra de investigaciones: Se seleccionaron por muestreo no probabilístico intencional 27 artículos científicos que conformaron el contenido teórico y cumplieron con los criterios establecidos por los autores.

DESARROLLO

Generalidades de la atención al paciente con defectos oculares

El tratamiento de los pacientes con defectos oculares se realiza a través de diferentes tipos de prótesis oculares, que pueden suplir la falta total o parcial de un ojo humano y posibilita la corrección de secuelas congénitas o adquiridas, con fines estético y funcional. El éxito de esta compleja labor se fundamenta en la mejora de la calidad de vida y reincorporación del individuo a la sociedad.⁽¹³⁾

En la rehabilitación de los defectos oculares se pueden utilizar dos tipos de prótesis: una estándar o comercial y otra individual o personalizada. La comercial está disponible en una gama de tamaños, contornos, formas y colores con un periodo de uso postoperatorio provisional o inmediato y su desventaja es la estética y ajuste poco confiable. La prótesis personalizada se construye a partir de una impresión de la cavidad ocular del paciente con la ventaja de mantener un contacto íntimo con el lecho tisular y reducir las posibilidades de acumulación de líquidos en la interfaz tejido-prótesis, lo que disminuye la irritación tisular y crecimiento bacteriano. Además, posibilita la distribución equitativa de la presión y la incidencia de abrasión conjuntival.^(14,15)

A través de la historia las prótesis oculares se han confeccionado de diferentes materiales, en busca de una apariencia estética lo más próxima al ojo sano. Fueron utilizados objetos como piedras, conchas marinas, oro, porcelana, vidrio, hasta su sustitución a partir de 1947 cuando se produce la primera prótesis en plástico. Con el desarrollo científico y después de diferentes procesos físicos y químicos se llegó a la utilización del polimetil metacrilato (PMMA), el cual es utilizado actualmente por sus propiedades que lo hacen idóneo en la fabricación y adaptación del accesorio protésico. Este polímero por su biotolerancia es empleado en la confección de diferentes tipos de prótesis oculares como: keratoprótesis, prótesis oculares completas, cascarillas esclero corneales, implantes orbitarios, anillos para simbléfaron, conformadores y expansores.^(16,17)

Uso de las imágenes fotográficas en medicina

La técnica de la fotografía se define como el arte o proceso de producir imágenes a partir de la acción de la luz o energía radiante sobre una superficie impresionable, como una película o un sensor óptico. Los elementos para obtener una imagen fotográfica no han cambiado; sin embargo, los avances tecnológicos permiten, obtener fotografías de alta calidad con la comprensión y manipulación de la luz y el color, lo que facilita mejor percepción y análisis estético en las imágenes. Estos elementos hacen que la fotografía sea utilizada en varias áreas: ciencia, industria, diseño, artes y medicina.⁽¹⁸⁾

En medicina, se conoce que los primeros libros médicos fueron descriptivos, pero no ilustrados. Durante el período clásico no se utilizaron las imágenes en anatomía, cuando el tema se subordinaba

al estilo descriptivo de Galeno. Guido da Vigevano fue el primero en usar las imágenes del cuerpo humano en la Baja Edad Media; y tuvieron su florecimiento durante el Renacimiento, siendo su máximo exponente Leonardo da Vinci. Su estudio gráfico lo hizo precursor de la ilustración anatómica.^(19,20)

Los principios de la técnica fotográfica comienzan con Leonardo Da Vinci y su cámara oscura que proyectaba una imagen del exterior invertida dentro de la cámara, en la pared contralateral al orificio. Posterior el químico e inventor francés Nicéphore Niépce; logró grabar en 1829 la imagen en una papeleta sensible a la luz, y Daguerre refinó el proceso con plata comenzando así la larga historia de las cámaras iniciales y los rollos fotosensibles. En 1839, el citólogo francés Alfred François Donné realizó la primera aplicación mundial de la fotografía en la medicina y a él se atribuye la primera microfotografía. A mediados del Siglo XIX; Gurdon Buck en Cirugía Plástica y Reconstructiva probablemente fue el primero en la historia médica en utilizar fotografías pre y postoperatorias para demostrar los resultados de los procedimientos quirúrgicos.^(21,22)

Desde mediados del siglo XIX la fotografía ha formado parte de la actividad médica y ha experimentado múltiples saltos progresivos y revolucionarios. El paso evolutivo del revelado a la era digital superó un obstáculo que permitió el uso generalizado de la fotografía en medicina. Las imágenes fotográficas se han convertido en un nuevo estándar de documentación en el campo clínico y una de las herramientas más útiles con las que cuentan tanto el médico general, el forense, el cirujano plástico y estético, dermatólogo, óculo-plástico, médico estético, estomatólogo, así como otros profesionales de la salud.^(20,21)

La fotografía se emplea en odontología desde 1840 y ha sido fundamental en la práctica odontológica, al permitir registrar datos de pacientes y documentar hallazgos científicos de manera singular y precisa. Es utilizada por diversas especialidades odontológicas, ya que contribuye con el diagnóstico y la planificación del futuro tratamiento, facilita la documentación de casos clínicos, las implicaciones médico-legales, la comunicación con los técnicos de laboratorio y para dar un seguimiento a la evolución del tratamiento. Las imágenes dentales mejora significativamente la calidad de los registros clínicos al capturar detalles que serían difíciles o imposibles de documentar, lo que permite la calidad de la práctica clínica en la atención al paciente.^(18,23)

Aspectos normativos en el empleo de la fotografía en la práctica médica

El desarrollo científico técnico permitió dar un salto exponencial en el uso, almacenamiento y distribución de la fotografía como imagen médica. El surgimiento de Internet como red mundial de conectividad, el desarrollo de la fotografía digital, la simplificación y economía de las cámaras fotográficas digitales permitieron la divulgación masiva de la imagen a través de las plataformas

modernas de comunicación de las fotografías de pacientes. Desde el punto de vista de los valores ético-morales en relación con su empleo y publicidad se debe tener conocimientos sobre las repercusiones jurídicas de su mal uso. Debe estar sujeto a regulaciones y requerimientos éticos con implicaciones únicas relacionadas con los principios de respeto a la dignidad de las personas, beneficencia, no maleficencia, autonomía y privacidad. El almacenamiento, distribución y uso indebido de las imágenes puede ser penalizados por la ley.^(19,24)

Los profesionales de la salud deben resguardar la información confidencial del paciente; divulgar fotografías sin la autorización explícita implica una violación a la ley. Desde la interpretación legal, de la publicación de las imágenes se debe exigir el consentimiento expreso del titular de la imagen para autorizar su reproducción. Incluso, aun con la autorización correspondiente, el estándar para publicar imágenes de pacientes en multimedios, ya sea con motivos académicos o de promoción comercial, implica eliminar los datos personales sensibles o visibilizarlos la menor cantidad posible.^(19,22,25)

El derecho a la imagen impide, que por cualquier forma de registro visual se capte, reproduzca, difunda o publique sobre una persona de un modo que permita identificarla sin su aprobación. El paciente debe tener la capacidad de decidir si las imágenes serán publicadas. En caso de uso, podrá permitir o no que los archivos fotográficos sean compartidos con otras personas. Debe estar consciente que una vez que se publican o comparten se pierde todo control sobre las fotografías y por tanto exime al especialista de cualquier responsabilidad.^(19,22,25)

Se debe considerar la creación de departamentos especializados en fotografía en las instituciones de salud y que en ellos se definieran lineamientos escritos que regulen los requisitos para la toma de imágenes de los pacientes, así como su guarda, custodia y reserva. Ello posibilitaría que las imágenes se pudieran conservar y recuperar cuando sea necesario de manera segura, de acuerdo con la normativa legales vigente.^(19,22,25)

Descripción de la técnica fotográfica: ^(10,21,26,27)

1. Elección y preparación del equipo fotográfico:

- Asegurar un dispositivo digital con una resolución de al menos, 12 megapíxel (MP).
- Limpiar el lente de la cámara para evitar distorsiones en las imágenes.
- Verificar que las baterías estén completamente cargadas o conectar el dispositivo a una fuente de alimentación.

2. Aspectos previos:

- Consentimiento informado: Explicar el procedimiento al paciente y obtener su autorización.
- Colocar al paciente en posición sentado con la cabeza erecta y la vista al frente.
- Emplear un fondo de color neutro (gris o azul claro) para no interferir con la colorimetría del iris.

- Utilizar una fuente de luz blanca a una distancia de 15 cm del objetivo.
- Situar el dispositivo de captura en una posición fija y a una distancia de 8-10 cm aproximadamente del ojo del paciente.

- Ajustar la luz para garantizar una iluminación adecuada en el ojo del paciente.

3. Obtención de la imagen:

- Enfocar la cámara en la región del ojo del paciente.
- Indicar al paciente que mire la cámara del teléfono con el ojo en máxima apertura de los párpados y que no realice movimientos.
- Utilizar blefaróstato si la apertura parpebral es insuficiente que no permita la captura de la circunferencia total del iris.
- Capturar las imágenes del ojo del paciente sin movimiento de la cámara.

4. Diseño digital de la fotografía del iris:

- Revisar todas las imágenes capturadas para asegurar que estén enfocadas y sean de alta calidad.
- Editar la fotografía con el software de edición fotográfica (Adobe Photoshop) para eliminar el reflejo del flash blanco en el ojo.
- Realizar ajuste de tamaño de la imagen del iris (11 mm, 11,5 mm; 12 mm; 12,5 mm; 13 mm).
- Reducir el tamaño de la pupila a un rango de 3 mm.

5. Almacenamiento y archivo:

- Documentar adecuadamente cada fotografía, incluyendo la fecha, el nombre del paciente y cualquier información relevante asociada con la imagen.
- Guardar todas las imágenes en un formato digital de alta resolución.
- Organizar las imágenes en un sistema de archivo digital seguro y de fácil acceso.
- Etiquetar cada imagen de manera apropiada para facilitar la recuperación y la referencia.
- Realizar las anotaciones pertinentes en la historia clínica.

CONCLUSIONES

La técnica de toma de imagen digital del iris, en la rehabilitación protésica ocular permite realizar una reproducción fiel de las características del ojo sano, con resultados faciales adecuados. En consecuencia, para la calidad de las fotos es importante elegir un equipo fotográfico con alta resolución. Estas imágenes digitales tienen la ventaja que pueden ser documentadas, incluyendo la fecha, el nombre del paciente y cualquier información relevante asociada con la imagen que permite consultarse si se requiere el remplazo de una prótesis. Se describe una secuencia de pasos clínico para lograr con éxito la toma de la fotografía del iris

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Kumar S, Shill M, Gupta RK. Prosthodontic rehabilitation of an ocular defect: A case report. *Journal of Orofacial Rehabilitation* [Internet]. 2022 [cited 2025 Dic 13]; 2(2): [about 5 p.]. Available from: <https://ipswestbengal.com/wp-content/uploads/2023/07/S-manela-Sonu-K.pdf>
2. Álvarez Rivero AV. *Procedimientos básicos en la rehabilitación de los defectos maxilares*. La Habana: Editorial CIMEQ; 2013.
3. Vinent Céspedes AM, Martí Pool M, Céspedes Quevedo MC. Características clínicas y evolutivas de pacientes rehabilitados con prótesis oculares. *MEDISAN*[Internet]. 2021 [citado 10 Ene 2026]; 25(6): [aprox. 15 p.]. Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1029-30192021000601378&lng=es.
4. Escobar Camacho S, Ruiz LA. Caracterización de pacientes con cavidad anoftálmica en un centro médico en Colombia, en 10 años. *Rev Soc Colomb Oftalmol* [Internet]. 2022 [citado 15 Ene 2026];55(2):63-71. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/9288144.pdf>
5. Jacobs RJ, Yeoman JP, Pine KR, Pine NS, Stang-Veldhouse KN, Sloan BH. Ocular prosthetics in New Zealand. *NZ DENTAL JOURNAL* [Internet]. 2024 [cited 2025 Dic 1];120: [about 8 p.]. Available from: https://assets.nzda.org.nz/files/Archives/NZDJ_Articles/2024/Ocular-prosthetics-in-New-Zealand.pdf
6. Calzadilla Ricart D, Puig Capote E, Nápoles González I, Lazo Nodarse R, Hernández Reyes B, Castañeda Casal L. Caracterización clínico epidemiológica de los pacientes con alteraciones bucomaxilofaciales en la provincia Camagüey. *Arch méd Camagüey* [Internet]. 2023 [citado 21 Ene 2026]; 27: [aprox. 8 p.]. Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1025-02552023000100037&lng=es
7. Annabel LWG, Jelmer SR, Dyonne TH. Three-Dimensional Computer-Aided Design of a Full-Color Ocular Prosthesis with Textured Iris and Sclera Manufactured in One Single Print Job. *Mary Ann Liebert, Inc* [Internet]. 2021 [cited 2025 Dic 19];8(6): [about 5 p.]. Available from: <https://www.liebertpub.com/doi/pdf/10.1089/3dp.2021.0048>
8. Silva Vega EO, Zurita Gaibor JA, Silva León KE, Silva León KJ. Adaptación de prótesis oculares. *Rev Pertin Acad* [Internet]. 2023 [citado 10 Ene 2026];7(4): [aprox.11 p.]. Disponible en: <https://revistas.utb.edu.ec/index.php/rpa/article/download/2963/2669>
9. Reinhard J, Urban P, Bell S, Carpenter D, Sahoo M. Automatic data-driven design and 3D printing of custom ocular prostheses. *Nature Communications* [Internet]. 2024 [cited 2025

- Dic 115(1360): [about 14 p.]. Disponible en: <https://www.nature.com/articles/s41467-024-45345-5.pdf>
10. Zoltie T, Bartlett P, Archer T, Walshaw E, Gout T. Digital photographic technique for the production of an artificial eye. *Journal of Visual Communication in Medicine* [Internet]. 2021 [cited 2025 Dic 11];44(2): [about 5 p.]. Available from: <https://www.tandfonline.com/doi/epdf/10.1080/17453054.2021.1882294?needAccess=true>
 11. Gout T, Tim Zoltie T, Woodward A, Coleman E, Boele F, Chang B, et al. A cross-over, randomised feasibility study of digitally printed versus hand-painted artificial eyes in adults: PERSONAL-EYE-S - a study protocol [version 2; peer review: 2 approved]. *NIHR Open Research* [Internet]. 2023 [cited 2025 Dic 18];2(50): [about 17 p.]. Available from: <https://core.ac.uk/download/560948223.pdf>
 12. Ram Kim B, Hyun Kim S, Sang Ko J, Woon Baek S, Kyung Park Y, Jung Kim Y et al. A Pilot Clinical Study of Ocular Prosthesis Fabricated by Threedimensional Printing and Sublimation Technique. *Korean J Ophthalmol* [Internet]. 2021[cited 2025 Dic 1];35(1): [about 7 p.]. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7904411/pdf/kjo-2020-0125.pdf>
 13. Nápoles González I, Santana Álvarez J, Álvarez Rivero A. Prótesis ocular obturatriz. **Archivo Médico Camagüey** [Internet]. 2024 [citado 10 Ene 2025]; 28: [aprox. e9966 p.]. Disponible en: <https://revistaamc.sld.cu/index.php/amc/article/view/9966>
 14. Sathe S, Pisulkar S, Nimonkar SV, Belkhode V, Borle A. Positioning of iris in an ocular prosthesis: A systematic review. *J Indian Prosthodont Soc.* [Internet]. 2020 [cited 2025 Apr 1];20:[about 7 p.]. Available from: https://www.google.com/search?q=perspective+of+the+manufacture+of+iris+for+ocular+prosthesis+by+es+method&oq=perspective+of+the+manufacture+of+iris+for+ocular+prosthesis+by+es+method&gs_lcrp=EgZjaHJvbWUyBggAEEUYOdIBCTI0OTNqMGoxNagCALACAA&sourceid=chrome&ie=UTF-8#ip=1
 15. Jain A, Rajeev V, Ugrappa S, See Gaik L. Cost-effective modified technique for custom made ocular prosthesis: A case report. *Reconstr Surg Anaplastol* [Internet]. 2021 [cited 2025 Dic 1];10(184):[about 4 p.]. Available from: <https://www.iomcworld.com/pdfdownload.php?download=open-access/costeffective-modified-technique-for-custom-made-ocular-prosthesis-a-case-report.pdf&aid=82469>
 16. Garrote Valero D, Gargantilla Madera AB. La primera prótesis ocular de la historia. *Gaceta Vocalía de Historia y Humanidades.* [Internet]. 2017 [citado 7 Feb 2025]; 12(20):[aprox.

- 17 p.]. Disponible en: [Internet]. <https://www.cgcoo.es/vocalia-historia-y-humanidades/primer-a-protesis-ocular-historia>
17. Nápoles González I, Nápoles Salas AM, Puig Capote E, Legrá Gainza E. Necesidad de implementar la consulta de prótesis bucomaxilofacial en la provincia Camagüey. AMC [Internet]. 2019 Ago [citado 05 Sep 2025]; 23(4): [aprox. 8 p.]. Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1025-02552019000400531&lng=es
18. Saravia Rojas MA, Geng Vivanco R ¿Fotografía dental disruptiva o convencional? ;Decide tú! Rev Estomatol Herediana [Internet]. 2023 [citado 05 Sep 2025]; 33(2): [aprox. 2 p.]. Disponible en: <https://revistas.upch.edu.pe/index.php/REH/article/download/4518/5091>
19. García Menéndez M, García Menéndez G, Soler Morejón CD. Consideraciones éticas sobre el uso de las imágenes fotográficas en medicina. Revista Cubana de Salud Pública. [Internet]. 2022 [citado 05 Sep 2025];48(Supl. revisiones): [aprox. e2296 p.]. Disponible en: <http://www.revsaludpublica.sld.cu/index.php/spu/article/download/2296/1832>
20. Arroyo Bielsa A, Arcediano Sánchez MV, Galindo García A, Pinedo García I, Rial Horcajo R. Encuesta sobre fotografía médica: tendencias actuales e implicaciones médico-legales. Angiología [Internet]. 2021[citado 05 Sep 2025];73(2):76-86. Disponible en: <https://scielo.isciii.es/pdf/angiologia/v73n2/0003-3170-angiologia-73-2-76.pdf>
21. Padilla Sierra MG, Garzón Rodríguez H, Martínez Castilla JM, Dávalos Dávalos AA, Polo Gallardo R. El uso correcto del teléfono inteligente en la fotografía estética del área facial: consejos y trucos. Cir. plást. Iberolatinoam [Internet]. 2022 [citado 17 Ene 2026];48(2): [aprox.10 p.]. Disponible en: <https://scielo.isciii.es/pdf/cpil/v48n2/0376-7892-cpil-48-02-0149.pdf>
22. Glorio R, Carbia S. Aspectos normativos acerca del uso de la fotografía en la práctica médica. Dermatología Argentina [Internet]. 2021 [citado 17 Ene 2026];27(4): [aprox.3 p.]. Disponible en: <https://dermatolarg.org.ar/index.php/dermatolarg/article/download/2287/1226>
23. Coronel Quintana PL, Villalba Sánchez GM. La fotografía dental como herramienta de apoyo a los docentes en odontología. Revista Paraguaya de Salud [Internet]. 2024 [citado 17 Ene 2026];1(2): [aprox.10 p.]. Disponible en: <https://saludparaguay.org/index.php/salud/article/download/6/6>
24. World Medical Association. World Medical Association Declaration of Helsinki: ethical principles for medical research involving human participants. JAMA [Internet]. 2025 [citado 7 Ene 2026];233(1): [aprox.5 p.]. Disponible en:

https://jamanetwork.com/journals/jama/articlepdf/2825290/jama_2024_sc_240016_1729349_326.39173.pdf

25. Barajas Ochoa A, Ramos Remus C. Publicar datos personales sensibles en las redes sociales: oportunidades de mejora. *Gac Med Mex* [Internet]. 2024 [citado 17 Ene 2026];160: [aprox.3p.]. Disponible en: <https://www.scielo.org.mx/pdf/gmm/v160n1/2696-1288-gmm-160-1-110.pdf>
26. Nimonkar S, Bansod AV, Belkhode V, Godbole S, Nimonkar PV. Digitalization of Iris Positioning in Prosthetic Eye: A Literature Review. *Journal of Datta Meghe Institute of Medical Sciences University* [Internet]. 2025 [cited 2025 Dic 17];20(2): [about 15 p.]. Available from: https://journals.lww.com/dmms/fulltext/2025/04000/digitalization_of_iris_positioning_in_prosthetic.2.aspx
27. Vergara Núñez C. Guía rápida de fotografía facial y de los maxilares en odontología. [Internet]. Santiago, Chile: Editorial Universidad de Chile; 2024 [citado 12 Ene 2026]. Disponible en: <https://repositorio.uchile.cl/xmlui/bitstream/handle/2250/198943/Guia-rapida-de-fotografia-facial.pdf?sequence=1>

Conflictos de interés

Los autores declaran que no existen conflictos de interés.

Contribuciones de los autores

Conceptualización: Ana María Nápoles Salas, Isidro de Jesús Nápoles González, Silvia María Díaz-Gómez, Alfredo Álvarez Rivero, German Antonio Guilarte León.

Curación de datos: Ana María Nápoles Salas, Isidro de Jesús Nápoles González, Silvia María Díaz Gómez, Alfredo Álvarez Rivero, German Antonio Guilarte León.

Análisis formal: Ana María Nápoles Salas, Isidro de Jesús Nápoles González, Silvia María Díaz Gómez, Alfredo Álvarez Rivero.

Investigación: Ana María Nápoles Salas, Isidro de Jesús Nápoles González, Silvia María Díaz Gómez, Alfredo Álvarez Rivero, German Antonio Guilarte León.

Metodología: Ana María Nápoles Salas, Isidro de Jesús Nápoles González, Silvia María Díaz Gómez, Alfredo Álvarez Rivero, Tania Victoria Puerto Pérez.

Administración del proyecto: Ana María Nápoles Salas.

Recursos: Ana María Nápoles Salas, Isidro de Jesús Nápoles González, Silvia María Díaz Gómez, Alfredo Álvarez Rivero, German Antonio Guilarte León.

Visualización: Ana María Nápoles Salas, Isidro de Jesús Nápoles González, Silvia María Díaz Gómez, Alfredo Álvarez Rivero, Tania Victoria Puerto Pérez.

Redacción – borrador original: Ana María Nápoles Salas, Isidro de Jesús Nápoles González, Silvia María Díaz Gómez, Alfredo Álvarez Rivero, German Antonio Guilarte León.

Redacción – revisión y edición: Ana María Nápoles Salas, Isidro de Jesús Nápoles González, Silvia María Díaz Gómez, Alfredo Álvarez Rivero,

Recibido: [12 enero 2026] | Aceptado: [24 febrero 2026] | Publicado: [15 marzo 2026] |

Citation: Nápoles-Salas, A; Nápoles, I; Díaz, S; Álvarez, A; Puerto, T; Guilarte, G. Algunas consideraciones de la fotografía digital del iris para confección estética de prótesis ocular. Bionatura. 2026. Volumen 11, No 1. <https://doi.org/10.70373/RB/2026.11.01.2>

Peer review information: Bionatura thanks the anonymous reviewers for their contribution to the peer review of this work using <https://reviewerlocator.webofscience.com/>

All articles published by Bionatura Journal are freely and permanently accessible online immediately after publication, without subscription charges or registration barriers.

Publisher's Note: Bionatura stays neutral concerning jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license

[\(https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)



CALABAZA (*CURCUBITA SPP.*)

Full Spectrum Oil

1. Antioxidante, salud cardiovascular
2. Salud de la piel, soporte inmunológico
3. Salud de los huesos
4. **Salud de la mujer.** Alivio síntomas de la menopausia e inflamación pélvica.
5. **Salud del hombre.** Previene y cura la inflamación de la próstata. Reduce la hiperplasia prostática benigna (HPB).

NS: 41663-ALN-0124

CONTACTO: Dr. Julio Pineda Insuasti, PhD
info.biodiversity@gmail.com, Cel. +593 99 758 9267. Ibarra-Ecuador

SCIENTIFIC PARTNER: <https://cebaecuador.org/>
inf.ceba@gmail.com, Cel + 593 99 579 7813. Ibarra-Ecuador
26/4/2026 info.biodiversity@gmail.com



El hidromiel entre tradición e innovación: revisión de su evolución histórica, tecnológica y de mercado con énfasis en Latinoamérica y Cuba

The hydromel between tradition and innovation: review of its historical, technological and market evolution with emphasis on Latin America and Cuba

Alvaro Hernández González^{1*}, Danay Aguilar Cedeño², Lourdes Mariana Crespo Zafra³, Leticia Espinosa Nieto⁴, George González Mosquera⁵

1Universidad de Camagüey Ignacio Agramonte Loynaz, Facultad de Ciencias Aplicadas. Departamento de Ciencia y Tecnología de los Alimentos. alvarohernandezgonzalez52@gmail.com. <https://orcid.org/0009-0001-4301-2787>

2Universidad de Camagüey Ignacio Agramonte Loynaz, Facultad de Ciencias Aplicadas. Departamento de Ciencia y Tecnología de los Alimentos. <https://orcid.org/0009-0000-0089-5367>

3 Universidad de Camagüey Ignacio Agramonte Loynaz, Facultad de Ciencias Aplicadas. Departamento de Ciencia y Tecnología de los Alimentos. <https://orcid.org/0000-0002-4799-3447>

4 Universidad de Camagüey Ignacio Agramonte Loynaz, Facultad de Ciencias Aplicadas. Departamento de Ciencia y Tecnología de los Alimentos. <https://orcid.org/0000-0002-4181-4276>

5 Escuela Agrícola Panamericana Zamorano. Honduras. <https://orcid.org/0009-0001-9847-4073>

*Correspondencia: alvarohernandezgonzalez52@gmail.com; Tel.: +53 59475636

<https://doi.org/10.70373/RB/2026.11.01.3>

Resumen

El estudio analiza la evolución histórica, tecnológica y de mercado de la hidromiel, una de las bebidas fermentadas más antiguas de la humanidad, actualmente en proceso de revalorización dentro del movimiento global de bebidas artesanales. Mediante una revisión narrativa de carácter exploratorio y analítico, se examina la trayectoria de esta bebida desde su origen milenario hasta su resurgimiento contemporáneo, identificando los factores socioculturales, económicos y tecnológicos que impulsan su expansión. La investigación se fundamenta en literatura científica y técnica reciente, así como en fuentes institucionales y de mercado, con énfasis en la situación de Latinoamérica y Cuba. Los resultados muestran que la hidromiel se ha consolidado como un producto premium, asociado a autenticidad, sostenibilidad y narrativa cultural, destacando su crecimiento sostenido en Europa y Norteamérica y su potencial emergente en países latinoamericanos. En la región, su desarrollo

enfrenta desafíos relacionados con la estandarización técnica, el marco regulatorio y la educación del consumidor, aunque cuenta con ventajas competitivas como la diversidad de mieles florales, la tradición apícola y la riqueza frutal. En el caso cubano, la calidad de la miel, la estructura apícola consolidada y el trabajo de instituciones como el CIAPI constituyen bases favorables para la elaboración de hidromieles diferenciadas, aunque su expansión requiere estrategias de fomento, claridad normativa y orientación hacia nichos turísticos y gourmet. El estudio concluye que la hidromiel representa una convergencia entre tradición, innovación y sostenibilidad con alto potencial cultural y económico.

Palabras Clave: hidromiel, bebidas fermentadas, innovación alimentaria, apicultura, sostenibilidad.

Abstract

This study analyzes the historical, technological, and market evolution of mead, one of humanity's oldest fermented beverages, currently undergoing a revaluation within the global craft beverage movement. Through an exploratory and analytical narrative review, the study examines the trajectory of this beverage from its ancient origins to its contemporary resurgence, identifying the sociocultural, economic, and technological factors driving its expansion. The research is based on recent scientific and technical literature, as well as institutional and market sources, with an emphasis on the situation in Latin America and Cuba. The results show that mead has established itself as a premium product, associated with authenticity, sustainability, and cultural narrative, highlighting its sustained growth in Europe and North America and its emerging potential in Latin American countries. In the region, its development faces challenges related to technical standardization, the regulatory framework, and consumer education, although it boasts competitive advantages such as the diversity of floral honeys, the beekeeping tradition, and the abundance of fruit. In Cuba, the quality of the honey, the established beekeeping infrastructure, and the work of institutions like CIAPI provide a favorable foundation for the production of distinctive meads, although their expansion requires promotional strategies, regulatory clarity, and a focus on niche tourism and gourmet markets. The study concludes that mead represents a convergence of tradition, innovation, and sustainability with high cultural and economic potential.

Keywords: mead, fermented beverages, food innovation, beekeeping, sustainability.

Introducción

La bebida conocida como hidromiel, también denominada “mead” o “honey-wine” en la literatura anglosajona, es una de las más antiguas de la humanidad. Se caracteriza por la fermentación de miel diluida en agua mediante levaduras¹. Evidencias arqueológicas sitúan su práctica en la China

neolítica de hace aproximadamente 7.000 años antes de Cristo, lo que la convierte en un antecedente directo de muchas bebidas fermentadas modernas^{2,3}.

En la historia de la alimentación global, la hidromiel ha ocupado un papel distintivo: bebida ritual, símbolo de poder, componente de banquetes y celebraciones, y a la vez objeto de tradiciones populares en diversas culturas como la griega, nórdica, eslava y africana^{2,3}. Las culturas egipcia y sumeria, valoraban tanto sus propiedades simbólicas como terapéuticas. Por otro lado, en las culturas vikinga, celta y griega, la hidromiel, desempeñó un papel en las ceremonias y fiestas religiosas, a menudo asociadas con los dioses^{2,4}.

Pese a su carácter ancestral y su presencia en diversas tradiciones culturales, la hidromiel ha permanecido al margen de la producción y consumo masivo durante largos periodos, sin embargo, recientemente, ha comenzado a experimentar un renacimiento ligado al movimiento artesanal de bebidas fermentadas⁵.

En ese sentido, la hidromiel se presenta no solo como un producto alcohólico sino también como elemento cultural y social, con un desfase histórico entre su origen y su actual contexto de revalorización lo que la hace relevante para una revisión que integre sus dimensiones históricas, culturales, tecnológicas y de mercado.

Se aprecia que existe una carencia de literatura, que sintetice de forma actualizada la situación de la hidromiel en Latinoamérica y en particular en Cuba, donde su producción, comercialización y difusión se encuentran en estadios incipientes y relativamente poco documentados. Al elaborar una revisión centrada en esta bebida, su historia y su potencial emergente en Latinoamérica y Cuba, se cubre una brecha académica relevante y se aporta al entendimiento de cómo los alimentos fermentados ancestrales pueden reincorporarse al panorama gastronómico y de bebidas contemporáneas.

En tal sentido, se traza como objetivo general analizar la trayectoria de la hidromiel en la cultura alimentaria global, con un enfoque en su resurgimiento contemporáneo y su estado actual en Latinoamérica, con énfasis en Cuba.

Materiales y Métodos

El presente trabajo se desarrolló como una revisión narrativa de carácter exploratorio y analítico, orientada a sintetizar la evolución histórica, cultural, tecnológica y de mercado de la hidromiel a nivel global, con especial énfasis en su situación en Latinoamérica y Cuba. El propósito fue identificar patrones, vacíos de conocimiento y oportunidades de desarrollo vinculadas a esta bebida fermentada ancestral en el contexto contemporáneo.

La revisión se fundamentó en literatura científica, técnica y documental publicada entre 2018 y 2025, complementada con referencias históricas y reportes sectoriales relevantes. Se consultaron bases de

datos académicas de acceso internacional tales como Scopus, ScienceDirect, SpringerLink, Web of Science y Google Scholar, además de fuentes institucionales (FAO, ONEI, MINAG, CIAPI, y observatorios de mercado como Fortune Business Insights, Spherical Insights & Consulting y Business Research Insights).

Se seleccionaron documentos que cumplieran los siguientes criterios: temas relacionados con hidromiel, apicultura, meliponicultura o bebidas fermentadas derivadas de la miel; publicados en español, inglés o portugués y que contuvieran información empírica, estadística o de revisión relevante al periodo de análisis. Se excluyeron publicaciones de carácter divulgativo sin respaldo técnico, material publicitario o artículos sin acceso verificable a fuente primaria.

La información fue organizada mediante matrices de síntesis, lo que permitió identificar tendencias, factores impulsores, limitaciones y oportunidades emergentes. El análisis siguió los lineamientos de revisión narrativa integrativa, con enfoque descriptivo-comparativo y de análisis interpretativo.

Resultados

1. El renacimiento de la hidromiel

1.1. Factores impulsores del resurgimiento

En las últimas dos décadas, la hidromiel ha experimentado una revitalización notable, impulsada por una confluencia de factores socioculturales, de mercado y tecnológicos. Primero, el auge del movimiento de bebidas artesanales (“craft”) ha permitido que productos fuera de los segmentos tradicionales (cerveza, vino, destilados) hallen un espacio de innovación y especialización; en este contexto, la hidromiel se presenta como un producto con historia, diferenciación y potencial premium^{6,7,8}.

En segundo lugar, los consumidores contemporáneos muestran crecientes preferencias por productos “auténticos”, con ingredientes naturales, origen visible, y cuyos procesos de elaboración pueden ser comprendidos como parte del valor del producto. La hidromiel cumple estos requisitos al utilizar miel, un endulzante natural, y a menudo libre de gluten, lo que la hace especialmente atractiva en segmentos con sensibilidades dietéticas o conciencia de salud^{6,9}. Asimismo, Liu et al., (2024)¹⁰, muestran en su estudio experimental, que la percepción de alimentos hechos a mano “handmade” aumenta la valoración de la calidad y la autenticidad de alimentos orgánicos, mecanismos que se trasladan a bebidas artesanales como la hidromiel y que la narración sobre origen y proceso (storytelling) incrementa la disposición a pagar por productos que transmiten tradición y trazabilidad. Tercero, la dimensión simbólica y cultural de la hidromiel ha sido retomada por los productores craft: su historia milenaria, su conexión con tradiciones vernáculas y su imagen de “bebida antigua pero reinventada” funcionan como *storytelling* eficiente para el mercado premium¹¹. Además, el énfasis en la sostenibilidad: apicultura local, menor uso de agua, menor impacto ambiental frente a grandes

cervecerías, ha sido resaltado como elemento de valor añadido dentro de estrategias de comercialización de hidromieles contemporáneas¹². Según Pignagnoli et al., (2023)¹³, estudios de evaluación del ciclo de vida (LCA) indican que la huella de carbono de la producción de miel es fuertemente dependiente del sistema apícola y de factores logísticos como transporte, alimentación suplementaria en periodos secos; sin embargo, cuando la apicultura se gestiona en sistemas estacionarios y locales, la integración de prácticas sostenibles y la trazabilidad pueden favorecer la narrativa ambiental y social, como por ejemplo, conservación de polinizadores, aspectos que consumidores premium valoran al elegir bebidas artesanales.

Por último, la diversificación de estilos como: “session meads” (de baja graduación alcohólica), variedades espumosas, híbridos con sidra o cerveza y lotes con mieles monoflorales o con frutas, ha permitido que la hidromiel acceda a nuevos perfiles de consumo, no únicamente como una bebida de degustación sino como una alternativa “social” más ligera: como nichos gourmet, canales direct-to-consumer (DTC), ventas online y experiencias turísticas (catas, visitas a colmenares), lo que potencia su atractivo comercial en la cultura craft actual^{3,6,7}.

1.2. Innovación y tipologías

Una parte central del renacimiento de la hidromiel ha sido la innovación formal: tanto en los estilos y tipologías como en las técnicas de producción. Tradicionalmente, los estilos clásicos de hidromiel incluyen el tradicional (solo miel-agua-levadura), el metheglin (añadido de especias o hierbas) y el melomel (con frutas añadidas) y también el cyser (mezcla de miel y manzana). En la era craft, estos estilos han sido reinterpretados y ampliados con creatividad¹⁴.

Por ejemplo, muchas meaderías modernas (pequeñas fábricas de hidromiel) producen “session meads” de baja graduación (4-7 % alcohol por volumen (ABV)) para adaptarse a patrones de consumo menos intensos, lo que permite una entrada más accesible al mercado¹⁵. También se realizan fermentaciones salvajes o espontáneas, añejamientos en barrica (roble, whisky, tequila) y uso de mieles de origen floral único o “single origin” para enfatizar terroir y micro-lotes¹⁶.

Las innovaciones en envases y canales de comercialización también han cobrado importancia: el uso de latas, botellas premium, envases ecológicos y venta directa online (DTC) ha permitido que pequeñas productoras accedan al mercado global sin depender exclusivamente del canal tradicional¹⁷.

Desde la perspectiva sensorial y tecnológica, las investigaciones recientes han abordado la optimización de nutrientes en la fermentación de miel (que posee una composición muy distinta a los cereales), la gestión de compuestos de aromas derivados de mieles florales o de frutas añadidas, y la estabilización microbiológica para mejorar calidad y consistencia¹⁸. Estos avances técnicos han

permitido que la hidromiel craft pueda competir en calidad con vinos y cervezas artesanales de alto nivel.

2. El mercado global contemporáneo de la hidromiel

2.1. Principales países productores y comercializadores

En los últimos años, el mercado global de la hidromiel ha mostrado un crecimiento sostenido, aunque partiendo de una base relativamente pequeña. Según un informe de Spherical Insights & Consulting (2024)¹⁹, el valor global del mercado de bebidas de hidromiel pasó de aproximadamente USD 532,5 millones en 2023, a una previsión de USD 1.545,3 millones en 2033, lo que representa una tasa compuesta de crecimiento anual (CAGR) de ~11,24 % para ese periodo (ver figura 1).

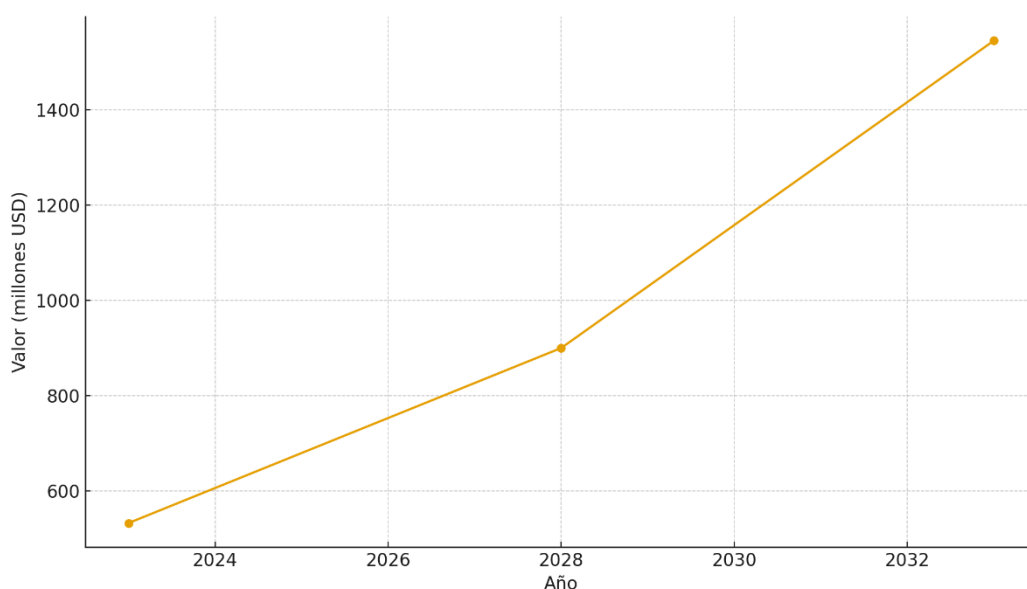


Figura 1. Crecimiento proyectado del mercado global de hidromiel (2023–2033)

*Elaboración propia por datos reportados por Spherical Insights & Consulting (2024) y Fortune Business Insights (2025)^{19,20}.

Otras estimaciones también indican que el mercado global alcanzará cifras de casi USD 1.395,7 millones en 2032 desde unos USD 591,5 millones en 2024, con una CAGR ~11,33 % según un informe de Fortune Business Insights (2025)²⁰. Estas cifras ponen de manifiesto que la hidromiel se está consolidando como un segmento de bebidas alcohólicas premium emergente.

Desde el punto de vista geográfico, varias fuentes coinciden en que Europa y Norteamérica dominan el mercado; Europa representaba aproximadamente el 41 % del consumo y Norteamérica cerca del 33 %,¹⁹ (ver figura 2). En Norteamérica, la proliferación de meaderies ha sido un factor clave, destacándose empresas como B. Nektar y Schramm's Mead en EE.UU., que han ayudado a profesionalizar el producto y a elevar su visibilidad mediática. Además, países europeos con tradición, como Polonia y los países bálticos, siguen siendo actores relevantes tanto en producción como en exportación⁹.

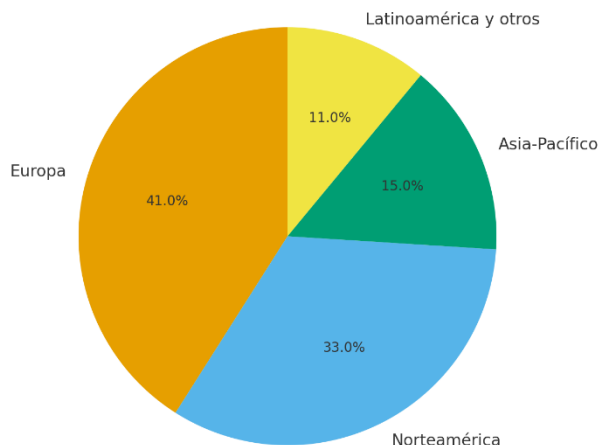


Figura 2. Distribución geográfica del consumo global de hidromiel

*Elaboración propia por datos reportados por Spherical Insights & Consulting (2024)¹⁹.

2.2. Estrategias de comercialización y posicionamiento

En cuanto a las estrategias de comercialización, el mercado de la hidromiel adopta múltiples vías de posicionamiento y canales de comercialización, adaptadas a su naturaleza de bebida artesanal premium. Como se ha señalado en informes de mercado, una parte importante de la expansión de la hidromiel se basa en la segmentación de nicho: consumidores dispuestos a pagar un mayor precio por productos con historia, origen visible (mieles monoflorales, etiquetas de “single-origin”), y además con atributos saludables (sin gluten) o sostenibles (apicultura local)^{9,21}.

Los canales de comercialización incluyen tiendas de especialidad, bodegas online, marketplaces DTC (direct-to-consumer) y ferias/gourmet. Según la literatura de mercado, el canal online ha cobrado especial relevancia en los últimos años en el mercado de la hidromiel, lo que permite a productores artesanales acceder a mercados internacionales con menores costos de distribución²². Para productos artesanales de nicho como la hidromiel, los canales DTC (tienda online propia, clubes de suscripción, catas virtuales/presenciales reservadas) permiten capturar margen y construir relación con consumidores recurrentes; no obstante, los estudios advierten que el éxito en DTC exige capacidades en logística, cumplimiento normativo y conversión digital, factores que condicionan la escalabilidad²³.

En términos de posicionamiento de precios, la hidromiel a menudo se ubica en la categoría “premium” o incluso “super-premium”. Los informes señalan que la producción de hidromiel requiere mayor cantidad de miel, que la cerveza de cebada, lo que incrementa los costos de materias primas y presión en el margen, pero también permite justificar un mayor precio final al consumidor⁹.

La premiumización, es decir, la estrategia de ubicar la hidromiel en una categoría de producto de mayor precio por unidad y por experiencia, tiene sustento en la literatura sobre bebidas y alimentos diferenciados²⁴. Hu et al., (2024)²⁵, en su investigación sobre la disposición a pagar por atributos como sostenibilidad, trazabilidad y relato territorial muestran que ciertos segmentos como: consumidores gourmet, turistas gastronómicos, compradores con conciencia ambiental, están dispuestos a pagar un premium, siempre que la comunicación sea creíble y verificable, por ejemplo: certificaciones e información de la cadena de suministro. Por tanto, la política de precios debe combinar justificación técnica (costos de materia prima, miel y procesos de barrica/añejamiento) con estrategias de credibilidad (etiquetado, transparencia, certificaciones).

2.3. Análisis de precios y posicionamiento

La hidromiel se comercializa en una variedad de presentaciones que reflejan tanto su diversidad de estilos como las prácticas de envasado heredadas de la industria de bebidas (vino y cerveza). Según Reitenbach et al., (2025)², las presentaciones más habituales son:

Hidromiel tranquila (still): embotellada en formatos similares a los del vino (750 mL, 375 mL), es la presentación dominante para meads destinados a consumo de sobremesa o gastronómico.

Hidromiel espumosa (sparkling): envasada en botellas tipo champán o en latas/packaging, este formato apunta a segmentos sociales y de cóctel por su carácter refrescante.

Session meads / hydromels (baja graduación): productos de baja graduación alcohólica diseñados para consumo social (estilo “session”), a menudo en botellas pequeñas (330–375 mL) o latas.

Melomels, metheglins y variantes aromatizadas: embotelladas tanto en formatos de vino como en pequeñas botellas tipo licores según la intención de consumo (degustación vs. mezcla).

Kegs y dispensado a granel: para mercados de restauración o eventos, algunas productoras optan por barriles (kegs) formato con ventajas logísticas y de sostenibilidad en ciertas cadenas de suministro²⁶.

La hidromiel en botellas de 750 mL o equivalente, puede situarse en una categoría superior al de muchas cervezas artesanales estándar, acercándose a vinos espumosos artesanales en precios. Uno de los informes de Business Research Insights en (2025)⁹, señala que el mercado global alcanzará valores de USD 4.19 billones para bebidas de hidromiel en 2034, lo que implica un gran margen de crecimiento desde la base actual (USD 0.91 billones estimados en 2025).

Además, los informes señalan que variantes innovadoras (sabores con frutas, bajas alcolemias, ediciones limitadas, barrica) permiten precios más elevados. En ese contexto, el posicionamiento de una hidromiel premium implica diferenciarse por calidad de ingredientes (mieles especiales, frutas tropicales, barrica), presentación (botella decorativa, edición limitada) y canal (márketing gourmet,

experiencias de cata)⁹. Otro estudio como el de Market Research (2024)¹⁷, menciona que la percepción del consumidor también juega un rol clave: el atributo “historia ancestral” y la percepción de “bebida de culto” permiten premiumización de la hidromiel.

3. El panorama latinoamericano

3.1. Estado incipiente y características regionales

En Latinoamérica la producción y comercialización de hidromiel se encuentra en una fase mayoritariamente incipiente y micro-escala: predominan emprendimientos artesanales, proyectos académicos y pequeñas meaderies que exploran variedades locales de miel y frutas autóctonas como factores de diferenciación^{27,28}.

La región presenta dos ventajas comparativas claras para el desarrollo de hidromieles con identidad local: en primer lugar, la gran diversidad de mieles florales y la existencia de prácticas tradicionales de apicultura y meliponicultura (abejas sin aguijón) que permiten acceso a mieles de perfiles sensoriales singulares, y en segundo lugar, la riqueza frutal (frutas nativas y tropicales) que favorece la elaboración de melomels y fusiones innovadoras^{29,30}.

Sin embargo, la literatura y los estudios de campo coinciden en que la producción de hidromiel está muy fragmentada y enfrenta desafíos técnicos como estandarización y control microbiológico, regulatorios como clasificación fiscal y sanitaria ambigua y comerciales como escasa educación del consumidor que obstaculizan la escalabilidad^{27,28}.

Argentina y Chile

En la región andina y en el cono sur, existen iniciativas académicas y empresariales destinadas a evaluar la viabilidad técnica y comercial de la hidromiel. En Chile, por ejemplo, se han desarrollado planes de negocio y proyectos de factibilidad que analizan la producción local, incluyendo los costos, mercados objetivo y posibilidades de exportación, lo que evidencia interés público-privado y académico en transformar proyectos artesanales en empresas sostenibles²⁸. En Argentina, la confluencia del movimiento cervecero artesanal y el interés por bebidas tradicionales ha favorecido la aparición de micro-productores que combinan mieles patagónicas o de monte con frutas regionales; sin embargo, la documentación científica publicada específica sobre hidromiel argentina aún es limitada²⁷.

Brasil

Brasil concentra ya una cantidad notable de pequeñas meaderies y productores artesanales distribuidos en varios estados, desde São Paulo hasta Santa Catarina, aprovechando tanto mieles monoflorales como mezclas con frutas regionales^{31,32}. La literatura sobre apicultura brasileña y sobre la valorización de mieles regionales sugiere que la biodiversidad florística del país ofrece

oportunidades únicas para hidromieles con alta diferenciación sensorial, aunque la investigación académica enfocada directamente a la hidromiel brasileña sigue siendo emergente³¹.

México

México presenta una condición particularmente favorable debido a dos factores: en primer lugar, la larga tradición milenaria de meliponicultura (abejas sin aguijón) en la región mesoamericana con mieles de *Melipona* spp. altamente valorizadas y, en segundo lugar, la existencia de bebidas fermentadas tradicionales (pulque, tesgüino) que han mantenido comunidades de fermentación y conocimiento microbiológico local^{29,30}. Investigaciones recientes y programas de conservación y valorización de meliponicultura han impulsado iniciativas para recuperar y comercializar mieles nativas, lo que abre la puerta a hidromieles “de tradición” elaboradas con mieles meliponas; sin embargo, persisten retos de conservación de especies y de estandarización productiva^{30,33}.

3.2. Desafíos comunes en la región

Los estudios regionales y revisiones sobre meliponicultura y apicultura identifican varios retos recurrentes que afectan también a la cadena de valor de la hidromiel en Latinoamérica:

1. Marco regulatorio y clasificación tributaria: en muchos países no existe una categoría normativa específica para la hidromiel; a menudo se la encasilla como “vino de miel” o se aplica normativa de bebidas alcohólicas genérica, lo que complica registros sanitarios, etiquetado y acceso a mercados formales²⁸.
2. Acceso a insumos y estandarización: la heterogeneidad de mieles (variación estacional y florística) y la falta de insumos tecnológicos (levaduras seleccionadas, nutrientes, equipos de fermentación) dificultan la estandarización de procesos y la consistencia sensorial de lotes. Investigaciones en fermentación como la de Jose-Salazar et al., (2024)¹⁸, muestran que la optimización de nutrientes y el uso de cepas no-*Saccharomyces* pueden mejorar la estabilidad y perfil aromático, pero la transferencia tecnológica hacia pequeños productores es limitada.
3. Escala y economía de materia prima: la miel es un insumo relativamente caro y sujeto a variabilidad productiva; la producción a pequeña escala hace difícil reducir los costos y competir en precio frente a bebidas industriales, por lo que la estrategia predominante es la premiumización^{27,31}.
4. Conservación de polinizadores y riesgos ambientales: la meliponicultura y la apicultura enfrentan amenazas (deforestación, plaguicidas, estrés climático) que afectan la disponibilidad de mieles especiales; instrumentos de conservación y manejo sostenible son necesarios para asegurar materias primas de calidad^{29,30}.
5. Educación del consumidor y canal de mercado: la baja familiaridad del consumidor promedio con la hidromiel exige inversiones en educación, presencia en ferias gourmet y alianzas con el turismo gastronómico para crear demanda³⁴.

3.3. Oportunidades y fortalezas competitivas

A pesar de los desafíos, la región ofrece oportunidades claras para el desarrollo de hidromieles distintivos:

1. Diferenciación por origen: etiquetas “single-origin” de mieles nativas y uso de frutas autóctonas permiten posicionar hidromieles como productos gourmet con fuerte relato territorial²⁸.
2. Turismo gastronómico y experiencias: las experiencias de cata, visitas a colmenares y maridajes con cocina local son vías naturales para introducir el producto al turista gastronómico y al consumidor local con mayor poder adquisitivo³⁴.
3. Investigación aplicada: colaboraciones entre universidades y emprendimientos (proyectos de tesis, pilotaje técnico) pueden acelerar la transferencia de tecnología para estandarización, control de calidad y diseño de productos^{18,27}.
4. Conservación y marca país: hidromieles ligadas a prácticas de conservación de polinizadores y a iniciativas comunitarias (meliponicultura), pueden acceder a nichos de mercado interesados en sostenibilidad y comercio justo²⁹.

4. El caso de Cuba

4.1. Contexto nacional

En Cuba, la apicultura cuenta con una tradición relevante: el país es reconocido por la calidad de su miel, debido a su clima tropical, la diversidad de flora y la baja utilización de agroquímicos en muchas áreas apícolas³⁵. Según datos del Food and Agriculture Organization (FAO) en (2009)³⁶, aproximadamente el 25 % de la producción de miel cubana (que en su conjunto ha alcanzado alrededor de 8 000 – 10 000 toneladas anuales) procede de fuentes de manglares, lo que refleja la singularidad ecológica del territorio apícola cubano.

Según las estadísticas oficiales del Ministerio de la Agricultura compiladas por la Oficina Nacional de Estadísticas e Información (ONEI) en (2025)³⁷, la producción total registrada fue de 9,9 mil t en 2019; 7,8 mil t en 2020; 10,5 mil t en 2021; 9,2 mil t en 2022; y 6,7 mil t en 2023, con un rendimiento por colmena que pasó de 49,7 kg (2019) a 28,9 kg (2023) (ver figura 3); esto se atribuye a diversos factores, entre los que se destacan la elevada variabilidad geográfica en el desarrollo y rendimiento de las colmenas, la existencia de una base productiva fragmentada con productores de limitada eficiencia, así como la insuficiente generalización de los resultados científicos y las tecnologías disponibles para potenciar el aprovechamiento y la diversificación de la actividad apícola.³⁸

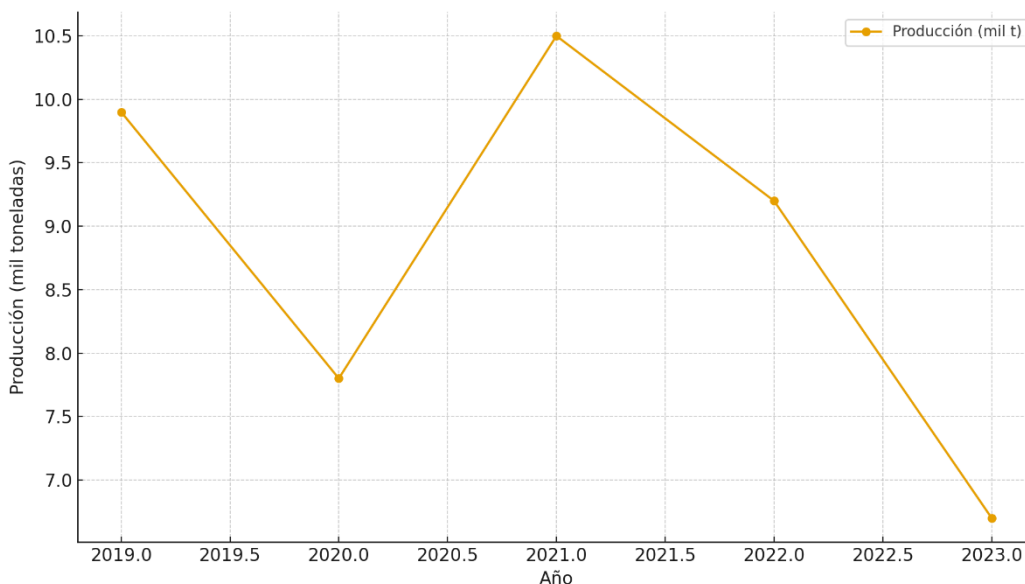


Figura 3. Evolución de la producción de miel en Cuba (2019–2023)

*Elaboración propia por datos reportados por Oficina Nacional de Estadísticas e Información (ONEI, 2025)37.

Por otro lado, el auge del turismo y la creciente demanda de productos autóctonos gourmet proporcionan un escenario propicio para la creación de productos innovadores basados en miel cubana, incluyendo potencialmente la elaboración de hidromiel (mead) que combine tradición (miel tropical, meliponicultura) con valor agregado.

4.2. Situación actual de la hidromiel en Cuba

En Cuba existen algunos proyectos pilotos y menciones a “vino de miel” o hidromiel artesanal, sin embargo, la documentación sobre su producción y comercialización a escala es todavía escasa, aunque se conocen ciertos elementos que permiten diagnosticar la situación:

La producción apícola cubana, como se mencionó, cuenta con alta calidad de miel y buenas condiciones florísticas, lo que representa una ventaja para su uso en hidromieles diferenciales. Honey (2022)39, reporta que algunos apicultores extraen miel “completamente limpia, sin químicos” y con rendimientos por colmena muy altos en contextos específicos.

La actividad apícola está organizada en torno a la empresa estatal Apicuba, que gestiona registros de apicultores (aproximadamente 1 500 registrados) y coordina la producción, investigación genética, reinas certificadas, etc.35.

Gran parte de la miel cubana se destina a la exportación; informes del MINCEX — Observatorio de Comercio, en (2023)40, indican que el volumen exportado representa una proporción muy elevada de la producción nacional, y que los mercados europeos (Alemania, Francia, España, Suiza y otros países de la Unión Europea) son los principales destinos de la miel cubana, tanto a granel como en presentaciones envasadas.

El Centro de Investigaciones Apícolas (CIAPI), unidad científica subordinada al Ministerio de la Agricultura dedicada a la apicultura, ha impulsado desde al menos la década de 2000 actividades de I+D y desarrollo de productos derivados de la miel, incluyendo formulaciones de hidromiel destinadas a evaluación y comercialización piloto; el CIAPI figura como la institución responsable de la investigación, estandarización y oferta tecnológica en la materia dentro del país^{41,42}.

La prensa cubana y comunicados oficiales describen que el CIAPI desarrolló prototipos de hidromiel y buscó articular su producción con empresas nacionales de bebidas para escalamiento y comercialización^{43,44}. Sin embargo, la actividad ha sido hasta ahora mayoritariamente experimental, de carácter piloto o artesanal y orientada a agregar valor a la miel (productos de gama diferenciada). Aunque la hidromiel aparece en la nomenclatura de productos y en iniciativas de I+D (por ejemplo, en la cartera de proyectos del CIAPI), la producción de hidromiel en Cuba se ha manejado, hasta la evidencia disponible, como un subproducto o línea transformada sin una serie estadística pública consolidada^{43,45}.

Conclusiones

La hidromiel representa una bebida ancestral en proceso de revalorización global; su resurgimiento responde a la convergencia de tendencias socioculturales, tecnológicas y de mercado, la búsqueda de productos auténticos y sostenibles, y la valorización del relato histórico y territorial asociado a los alimentos fermentados.

El mercado internacional de la hidromiel muestra una expansión sostenida y un claro proceso de premiumización. Con tasas de crecimiento superiores al 11 % anual, Europa y Norteamérica concentran la mayor parte de la producción y consumo, mientras que los nuevos actores del hemisferio sur comienzan a consolidar microindustrias especializadas con alto valor agregado.

En América Latina, la hidromiel se encuentra en una etapa incipiente, pero con potencial competitivo; la diversidad florística, la existencia de mieles nativas y la tradición apícola y meliponicultura constituyen ventajas comparativas que, junto con la investigación aplicada y el turismo gastronómico, podrían impulsar un desarrollo regional sostenible y diferenciado.

El caso cubano evidencia condiciones favorables para la introducción y desarrollo de hidromieles de identidad local. La calidad reconocida de la miel cubana, la estructura apícola organizada y la experiencia del CIAPI en I+D ofrecen una base técnica sólida para la formulación de hidromieles artesanales; sin embargo, su escalamiento requiere políticas de fomento, claridad regulatoria y estrategias de mercado orientadas a segmentos premium y turísticos.

La hidromiel se consolida como un vehículo de convergencia entre tradición, innovación y sostenibilidad; su rescate no solo tiene valor económico y gastronómico, sino también cultural y

ambiental, al promover prácticas apícolas sostenibles, la conservación de polinizadores y la valorización del patrimonio alimentario local.

Author Contributions: Conceptualization, A.H.G; D.A.C and L.M.C.Z; methodology, A.H.G; D.A.C; L.M.C.Z; L.E.N and G.G.M; formal analysis, L.M.C.Z and L.E.N.; investigation A.H.G; D.A.C and G.G.M.; writing—original draft preparation, A.H.G; D.A.C. and G.G.M; writing—review and editing, L.M.C.Z and L.E.N; supervision, L.M.C.Z and L.E.N. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research received no external funding.

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

Informed Consent Statement: Not applicable.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

Referencias

1. Deng F, Han D, Zhao J, Liu H. Progress on the brewing process of mead and its flavour components. *Adv Chem Mater Sci Res.* 2024;1(1):P123. doi:10.70114/acmsr.2024.1.1.P123
2. Reitenbach AF, Lorenzi AS, Ghesti GF, Santos PCM, Rodrigues IMT, Barbosa ADS, et al. Advances in mead aroma research: A comprehensive bibliometric review and insights into key factors and trends. *Fermentation.* 2025;11(4):226. <https://doi.org/10.3390/fermentación11040226>
3. Milligan M. History of mead. *HeritageDaily* [Internet]. 2020 Mar 11 [cited 2025 Nov 6]. Available from: <https://www.heritagedaily.com/2020/03/history-of-mead/126299>
4. Coletti GF. Mercado de bebidas en Brasil y en el mundo. Editorial Senacel Paulo: SePaulo, Brasil, 2022. Disponible en línea: <https://books.google.com.br/books?hl=ptBR&lr=&id=TOBeEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT16&dq=Mercado+de+bebidas+no+Brasil+e+no+mundo&ots=VZysIffISY&sig=ias3Z8T3UsmcHDSVm5J DdBB498w#>
5. Taylor E. Why Mead, the world's oldest drink, is on the rise again. *Vogue* [Internet]. 2018 Nov 15 [cited 2025 Nov 6]. Available from: <https://www.vogue.com/article/why-mead-is-popular-again>
6. Tomar U. Mead gains momentum as heritage drinks resurge. *Expert Market Research* [Internet]. 2023 [cited 2025 Nov 6]. Available from: <https://www.expertmarketresearch.com/featured-articles/mead-beverage-trend>
7. Gobbi L, Stanković M, Ruggeri M, Savastano M. Craft beer in food science: A review and conceptual framework. *Beverages.* 2024;10(3):91. doi:10.3390/beverages10030091

8. Webster CE, Barker D, Deed RC, Pilkington LI. Mead production and quality: A review of chemical and sensory mead quality evaluation with a focus on analytical methods. *Food Res Int.* 2025;202:115655. doi:10.1016/j.foodres.2024.115655
9. Business Research Insights. Mead beverages market size, trend [2025–2034] [Internet]. 2025 [cited 2025 Nov 6]. Available from: <https://www.businessresearchinsights.com/market-reports/mead-beverages-market-121689>
10. Liu Q, Cao J, Li S, Wei Y, Ma C. How hand-made affects consumers' perceived nutritional quality of organic food. *Front Nutr.* 2024; doi:10.3389/fnut.2024.1448751
11. RESET Media. Mead's modern revival: Summer's trendiest drink. *Reset-Media* [Internet]. 2024 Jun 15 [cited 2025 Nov 6]. Available from: <https://www.reset-media.com/trends/meads-modern-revival-summer-trendiest-drink>
12. Rehagen T. Mead gains more traction as a sustainable beer alternative. *The Washington Post* [Internet]. 2023 Aug 10 [cited 2025 Nov 6]. Available from: <https://www.washingtonpost.com/food/2023/08/10/mead-sustainability-beer-alternative/>
13. Pignagnoli A, Pignedoli S, Carpana E, Costa C, Dal Prà A, et al. Greenhouse gas emissions from honey production: Two-year survey in Italian beekeeping farms. *Animals (Basel).* 2023;13(4):766. doi:10.3390/ani13040766
14. Chitarrini G, Debiasi L, Stuffer M, Ueberegger E, Zehetner E, Jaeger H, et al. Volatile profile of mead fermenting blossom honey and honeydew honey with or without *Ribes nigrum*. *Molecules.* 2020;25(8):1818. doi:10.3390/molecules25081818
15. Royal Canadian Mead. Ancient beverage gets a modern twist: NC helps Royal Canadian Mead develop Ontario's first pure session meads [Internet]. *Niagara College*; 2019 Sep 17 [cited 2025 Nov 6]. Available from: <https://www.niagaracollege.ca/blog/2019/09/17/ancient-beverage-gets-a-modern-twist-niagara-college-helps-royal-canadian-mead-develop-ontarios-first-pure-session-meads/>
16. Backed By Bees. The mead renaissance: Trends, pairings & craft culture [Internet]. 2023 [cited 2025 Nov 6]. Available from: <https://backedbybees.com/blogs/the-meadmaker/the-mead-renaissance-modern-meadery-trends-and-innovations>
17. Market Research (Verified Market Reports). Mead beverages market size, trends, competitive insights & forecast 2033 [Internet]. 2024 [cited 2025 Nov 6]. Available from: <https://www.verifiedmarketreports.com/product/mead-beverages-market-size-and-forecast/>
18. Jose-Salazar JA, Ballinas-Cesatti CB, Hernández-Martínez DM, Cristiani-Urbina E, Melgar-Lalanne G, Morales-Barrera L. Kinetic evaluation of the production of mead from a non-*Saccharomyces* yeast. *Foods.* 2024;13(12):1948. doi:10.3390/foods13121948

19. Spherical Insights & Consulting. Global mead beverage market size to worth USD 1545.3 million by 2033 [Internet]. 2024 Jul 11 [cited 2025 Nov 6]. Available from: <https://www.globenewswire.com/news-release/2024/07/11/2911671/0/en/Global-Mead-Beverage-Market-Size-To-Worth-USD-1545-3-Million-By-2033-CAGR-Of-11-24.html>
20. Fortune Business Insights. Mead beverage market size, share & industry analysis, by type, distribution channel and regional forecast, 2024–2032 [Internet]. 2025 [cited 2025 Nov 6]. Available from: <https://www.fortunebusinessinsights.com/mead-market-102278>
21. Thøgersen J. ¿Cómo influye el etiquetado de origen en los envases de alimentos en la evaluación y las elecciones de los consumidores? *Food Policy*. 2023;119(C):102503. doi:10.1016/j.foodpol.2023.102503
22. Global Growth Insights. Mead beverages market size & growth [2033] [Internet]. 2025 [cited 2025 Nov 6]. Available from: <https://www.globalgrowthinsights.com/market-reports/mead-beverages-market-101085>
23. Rui M, Sparacino A, Merlino VM, Brun F, Massaglia S, Blanc S. Explorando los sentimientos y opiniones de los consumidores en el comercio electrónico de vinos: Un estudio comparativo entre países. *J Retail Consum Serv*. 2025;82:104097. doi:10.1016/j.jretconser.2024.104097
24. Huang M, De Vries H, Van Ittersum K. Understanding premiumisation: Drivers and outcomes in food and beverage markets. *Food Qual Prefer*. 2023;112:104693. doi:10.1016/j.foodqual.2023.104693
25. Hu T, Al Mamun A, Reza MNH, Wu M, Yang Q. Análisis de la disposición de los consumidores a pagar un precio superior por alimentos orgánicos. *Humanit Soc Sci Commun*. 2024;11:1249. doi:10.1057/s41599-024-03789-6
26. Marrucci L, Daddi T, Iraldo F. Identifying the most sustainable beer packaging through a life cycle assessment. *Sci Total Environ*. 2024;948:174941. doi:10.1016/j.scitotenv.2024.174941
27. Sánchez-Ojeda JR. El hidromiel: potencial en la industria de bebidas artesanales [Internet]. Ambato: Universidad Técnica de Ambato; 2025 [cited 2025 Nov 6]. Available from: <https://repositorio.uta.edu.ec/bitstreams/9f3f2e41-e37c-47d6-b4aa-ba0709ee40f9/download>
28. Díaz-Hernández CE. Plan de negocios para empresa Hidromiel (Meadery) [Internet]. Santiago de Chile: Universidad de Chile; 2020 [cited 2025 Nov 6]. Available from: <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/177296/Plan-de-negocios-para-empresa-Hidromiel-%28MEADERY%29.pdf>
29. Aldasoro-Maya EM, Rodríguez-Robles U, Martínez-Gutiérrez ML, Chan-Mutul GA, Avilez-López T, Morales H, et al. Stingless bee keeping: Biocultural conservation and sustainable livelihoods in Mesoamerica. *Front Sustain Food Syst*. 2023;7:1081400. doi:10.3389/fsufs.2022.1081400

30. Quezada-Euán JJG, May-Itzá WJ, de la Rúa P, Roubik DW. From neglect to stardom: How the rising popularity of meliponiculture is changing beekeeping in Mexico. *Apidologie*. 2022; doi:10.1007/s13592-022-00975-w
31. MeadWorld. Meaderies in Brasil [Internet]. 2024 [cited 2025 Nov 6]. Available from: <https://www.meadworld.com/meaderies/brasil>
32. Princesa do Cariri. Hidromel preparado a partir de la fermentación del mel silvestre de la Chapada do Araripe [Internet]. 2024 [cited 2025 Nov 6]. Available from: <https://www.princesadocariri.com.br/pz1o92t7q-hidromel-princesa-do-cariri-750-ml>
33. Martínez-Puc JF, Magaña-Magaña MA, Cetzal-Ix G, Mendoza-Arroyo GE, Sierra-Vásquez AC, Basu SK. Socio-demographic characteristics and participation of women in meliponiculture communities. *J Ethnobiol Ethnomed*. 2024; doi:10.1186/s13002-024-00745-1
34. Vit P, Meccia G, Spooner-Hart R, editors. *Memorias del 2024 Simposio Internacional JMF Camargo sobre Abejas sin Agujón*. Mérida (VE): Editorial APIBA-ULA; 2024. Available from: <https://unu.edu/sites/default/files/2024-06/Memorias%20JMF%20Camargo%20Symposium%202024%2012.pdf>
35. Donathan D. Beekeeping in Cuba. *Bee Culture* [Internet]. 2020 [cited 2025 Nov 6]. Available from: <https://beeculture.com/beekeeping-in-cuba/>
36. Food and Agriculture Organization (FAO). *Apiculture in Cuba* [Internet]. Rome: FAO; 2009 [cited 2025 Nov 6]. Available from: <https://www.fao.org/4/ap428e/ap428e00.pdf>
37. Oficina Nacional de Estadísticas e Información (ONEI). *Anuario — Capítulo Agropecuario: Indicadores seleccionados de la apicultura* [Internet]. 2025 [cited 2025 Nov 6]. Available from: <https://www.onei.gob.cu/sites/default/files/publicaciones/2025-01/09-agropecuario.pdf>
38. Tamayo-León R. Presidencia de la República de Cuba. *La apicultura cubana despegó, pero aún no lo suficiente* [Internet]. 2022 Nov 7 [citado 2026 Feb 9]. Disponible en: <https://www.presidencia.gob.cu/es/noticias/la-apicultura-cubana-despega-pero-aun-no-lo-suficiente/>
39. Honey M. Why Cuban honey bees are thriving. *CubaSupport* [Internet]. 2022 [cited 2025 Nov 6]. Available from: <https://www.cubasupport.ie/latest/why-cuban-honey-bees-are-thriving/>
40. Ministerio de Comercio Exterior y la Inversión Extranjera (MINCEX) — Observatorio de Comercio. *Miel de Abeja. Exportaciones cubanas y los principales mercados importadores* [Internet]. 2023 [cited 2025 Nov 6]. Available from: <https://observatorio.mincex.gob.cu/sites/default/files/informe/2023-04/Miel%20de%20Abeja.%20Exportaciones%20cubanas%20y%20los%20principales%20mercado%20importadores%20%28Observatorio%29.pdf>

41. Grupo Empresarial Agroforestal GAF – Ministerio de la Agricultura (MINAG). Centro de Investigaciones Apícolas (CIAPI) [Internet]. Havana: MINAG; [date unknown] [cited 2025 Nov 6]. Available from: <https://www.gaf.minag.cu/es/child/centro-de-investigaciones-apicolas/>
42. Food and Agriculture Organization (FAO). Integración del CIAPI en AGRIS: Un paso adelante para la apicultura cubana [Internet]. 2024 Jun 26 [cited 2025 Nov 6]. Available from: <https://www.fao.org/agris/es/news/integraci%C3%B3n-del-ciapi-en-agris-un-paso-adelante-para-la-apicultura-cubana>
43. Granma. Hidromiel y Propomáx Cinco, dos nuevos productos cubanos derivados de la miel. Granma [Internet]. 2018 May 13 [cited 2025 Nov 6]. Available from: <https://www.granma.cu/cuba/2018-05-13/hidromiel-y-propomax-cinco-dos-nuevos-productos-cubanos-derivados-de-la-miel>
44. Nicola M. Hidromiel: un camino diferente y alentador. Opciones [Internet]. 2012 Jun 12 [cited 2025 Nov 6]. Available from: <https://www.opciones.cu/cuba/2012-06-12/hidromiel-un-camino-diferente-y-alentador>
45. Oficina Nacional de Estadística e Información (ONEI). Notas explicativas de la clasificación del producto — incluye mención de hidromiel [Internet]. 2021 [cited 2025 Nov 6]. Available from: https://onei.gob.cu/sites/default/files/servicios/2022-02/2021_ccif_notas_explicativas_para_descargar.pdf

|Received: [12 enero 2026] |Accepted: [4 marzo 2026] |Published: [15 marzo 2026] |

Citation: Hernández González, A; Aguilar Cedeño, D; Crespo Zafra, LM; Espinosa Nieto, L; González Mosquera, G. La hidromiel entre tradición e innovación: revisión de su evolución histórica, tecnológica y de mercado con énfasis en Latinoamérica y Cuba. *Bionatura* 2026. Volumen 11, No 1. <https://doi.org/10.70373/RB/2026.11.01.3>

Peer review information: Bionatura thanks the anonymous reviewers for their contribution to the peer review of this work using <https://reviewerlocator.webofscience.com/>

All articles published by Bionatura Journal are freely and permanently accessible online immediately after publication, without subscription charges or registration barriers.

Publisher's Note: Bionatura stays neutral concerning jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Metales pesados y salud neurológica: una revisión sobre su efecto acumulativo y riesgos para la salud pública

Heavy metals and neurological health: a review of their cumulative effect and risks to public health

Denise Ilcen Contreras Zapata^{*1} dennycz@gmail.com . ORCID <https://orcid.org/0000-0001-7912-7095>

María Emilia Sánchez Rodríguez² mariaemiliasanch@gmail.com . ORCID <https://orcid.org/0009-0006-9367-8428>

Ivan Jahir Cedeño Santos³ jahircede4321@gmail.com . ORCID <https://orcid.org/0009-0009-6648-1146>

^{1,2,3}Universidad San Gregorio de Portoviejo, Ecuador

* Correspondence: dennycz@gmail.com; Tel.: (+593 980058456)

<https://doi.org/10.70373/RB/2026.11.01.4>

Resumen

Los metales pesados (como el plomo, mercurio o cadmio) y metaloides (como el arsénico) son elementos tóxicos que, al acumularse en el organismo, pueden causar graves daños a la salud. Su principal amenaza para el sistema nervioso es su capacidad para atravesar, la barrera hematoencefálica. Estudios científicos han identificado mecanismos comunes por los cuales estos metales ejercen su efecto neurotóxico: estrés oxidativo, interferencia con la señalización celular, disfunción mitocondrial y agotamiento de defensas antioxidantes. Estos mecanismos están vinculados al desarrollo de enfermedades neurodegenerativas, como el Alzheimer, el Parkinson, la esclerosis múltiple y la esclerosis lateral amiotrófica. La exposición concurrente a varios metales intensifica los efectos nocivos y acelera la aparición de enfermedades, incrementando el riesgo en grupos vulnerables que viven en ambientes no seguros. Esta revisión centra su análisis en el impacto acumulativo y sinérgico de los metales pesados en la salud neurológica, con énfasis en los factores de riesgo, los mecanismos subyacentes de toxicidad y las implicaciones para la salud pública.

Palabras clave: metales pesados; neurodegeneración; enfermedades neurodegenerativas; contaminación del agua por metales

Abstract

Heavy metals (such as lead, mercury, and cadmium) and metalloids (such as arsenic) are toxic elements that, when they accumulate in the body, can cause serious health problems. Their main threat to the nervous system is their ability to cross the blood-brain barrier. Scientific studies have identified common mechanisms by which these metals exert their neurotoxic effects: oxidative stress, interference with cell signaling, mitochondrial dysfunction, and depletion of antioxidant defenses. These mechanisms are linked to the development of neurodegenerative diseases, such as Alzheimer's, Parkinson's, multiple sclerosis, and amyotrophic lateral sclerosis (ALS). Concurrent exposure to several metals intensifies the harmful effects and accelerates the onset of diseases, increasing the risk in vulnerable groups living in unsafe environments. This review focuses its analysis on the cumulative and synergistic impact of heavy metals on neurological health, with an emphasis on risk factors, the underlying mechanisms of toxicity, and the implications for public health.

Keywords: heavy metals; neurodegeneration; neurodegenerative diseases; water pollution by metals

Introducción

La contaminación de los ríos ha emergido como un desafío ambiental de creciente magnitud, especialmente en las naciones en desarrollo, cobrando auge en las últimas décadas. La rápida industrialización y la intensificación de prácticas agrícolas han incrementado la descarga de efluentes tóxicos en cuerpos de agua, situándose entre las principales fuentes de deterioro ambiental a nivel mundial ⁽¹⁾. Estos contaminantes, que incluyen tanto compuestos orgánicos como metales pesados, no solo amenazan la biodiversidad acuática, sino que también comprometen la calidad del agua y representan un peligro latente para la salud humana debido a su persistencia y capacidad de bioacumulación.

La situación es aún más crítica en comunidades socioeconómicamente vulnerables, donde el acceso a infraestructuras adecuadas de saneamiento y sistemas de tratamiento de agua es limitado. Estas poblaciones, expuestas de manera desproporcionada a los riesgos asociados con la contaminación, presentan tasas elevadas de enfermedades crónicas y degenerativas, incluidas aquellas de naturaleza neurológica ⁽²⁾. En particular, la contaminación por metales pesados está asociada con la expansión de actividades como la minería y la extracción petroquímica, que han contribuido significativamente a la deforestación y degradación de los ecosistemas en la región occidental del Amazonas. ⁽³⁾

Entre los contaminantes más preocupantes se encuentran los metales pesados debido a su capacidad de inducir estrés oxidativo, alterar la homeostasis del calcio y promover procesos inflamatorios

crónicos en el sistema nervioso central. Estas vías de toxicidad han sido vinculadas al desarrollo de enfermedades neurodegenerativas como el Alzheimer y el Parkinson. La mayoría de las investigaciones se han centrado en la exposición a un solo metal, sin tomar en cuenta los efectos de múltiples metales, lo que resulta crucial, ya que las exposiciones humanas suelen ser a una combinación de ellos. ⁽⁴⁾.

Esta revisión centra su análisis en el impacto acumulativo y sinérgico de los metales pesados en la salud neurológica, con énfasis en los factores de riesgo, los mecanismos subyacentes de toxicidad y las implicaciones para la salud pública.

Materiales y métodos

Este estudio se basa en una revisión bibliográfica y documental exhaustiva de la literatura existente sobre el riesgo de contaminación por metales pesados en el agua y su impacto en el desarrollo de enfermedades neurodegenerativas.

Criterios de selección de fuentes

La revisión incluyó estudios publicados en revistas académicas indexadas, artículos de revisión, reportes de agencias internacionales y tesis doctorales relevantes al tema.

Los criterios de inclusión fueron:

- Publicaciones entre los años 1980 y 2024.
- Estudios que analicen la relación entre la exposición a metales pesados y las enfermedades neurodegenerativas en poblaciones humanas y modelos animales.
- Estudios en plomo, arsénico, cadmio y aluminio.
- Informes de organismos internacionales.
- Solo se incluyeron los estudios que contenían datos originales y están directamente relacionados con los efectos neurotóxicos de los metales pesados.

Criterios de exclusión:

- Estudios de opinión, editoriales, cartas al editor o resúmenes de conferencia de video o texto.
- Revisiones narrativas, revisiones sistemáticas o meta-análisis previos.
- Estudios centrados en intoxicaciones agudas o contaminación evidente (derrames, accidentes industriales) en lugar de exposición crónica.

Se identificaron 90 artículos científicos potencialmente relevantes para los objetivos del estudio. Tras la aplicación de estos criterios, 26 artículos fueron seleccionados para su análisis y discusión en la presente revisión narrativa.

Bases de datos y términos de búsqueda

La estrategia de búsqueda Se consultaron las siguientes bases de datos científicas: PubMed, Scopus, Web of Science, Google Scholar. Los términos de búsqueda utilizados fueron: "metales pesados", "neurodegeneración", "exposición a plomo", "contaminación por cadmio", "toxicidad de arsénico", "enfermedades neurodegenerativas", "contaminación del agua", y "enfermedad de Alzheimer", entre otros. Se utilizaron operadores booleanos para optimizar los resultados y se limitaron las búsquedas a estudios en inglés y español.

Análisis de datos

Los estudios seleccionados fueron analizados cualitativamente. Se identificaron las rutas de exposición a metales pesados, los mecanismos moleculares de toxicidad, los biomarcadores de daño neuronal y los resultados epidemiológicos más relevantes. Los datos se organizaron en función de la naturaleza del contaminante y su asociación con enfermedades específicas, como el Alzheimer, Parkinson, esclerosis múltiple, y otras patologías neurodegenerativas. Se realizó un análisis comparativo de los diferentes enfoques y hallazgos.

Resultados

Tabla 1. Epidemiología de la Exposición a Metales Pesados y Enfermedades Neurodegenerativas

Metal pesado	Clasificación química	Toxicocinética	Fuentes de contaminación en ríos	Hallazgos clave en cuerpos de agua	Implicaciones en salud/neurotoxicidad
Plomo (Pb)	Clase B – afinidad por ligandos azufre-donantes	Alta absorción gastrointestinal; cruza la barrera hematoencefálica; acumulación ósea y tisular; excreción lenta.	Minería, industria metalúrgica, baterías, emisiones vehiculares.	Detectado en altos niveles en ríos Calera, Amarillo, Puyango y Estero Salado, excediendo normas ambientales.	Neurotoxicidad crónica: altera liberación de neurotransmisores, mimetiza calcio, provoca déficit cognitivo y riesgo de

neurodegeneración.

(5-7)

Mercurio (Hg)	Clase B – afinidad por ligandos azufre- donantes	Metilación en sedimentos; metilmercurio cruza barrera hematoencefálica; bioacumulación en peces	Minería aurífera (legal e ilegal), industria cloro-álcali, vertidos industriales	Altas concentraciones en la cuenca amazónica y ríos Pastaza; metilmercurio presente en peces	Forma orgánica es altamente neurotóxica: genera estrés oxidativo y disfunción mitocondrial, asociado a Alzheimer y Parkinson. ^(3,8)
Cadmio (Cd)	Clase B – afinidad por ligandos azufre- donantes	Absorción digestiva moderada; acumulación renal y hepática; vida media larga	Industria plástica, pinturas, textiles, metalmecánica	Altos niveles en Estero Salado y río Chone, superando 10x límites permitidos	Alteración de la función mitocondrial y estrés oxidativo, aumenta apoptosis neuronal. ^(6,9)
Arsénico (As)	Semimetal; As(III) más tóxico que As(V)	Ingestión principal vía; distribución a hígado, riñones y SNC; eliminación renal parcial	Minería, pesticidas, aguas subterráneas contaminadas	Detectado en cuenca Puyango- Tumbes y ríos mineros	Neurotoxicidad indirecta, disrupción de enzimas, vinculado a cáncer y alteraciones neurológicas. ^(7,10)

Aluminio (Al)	Clase A – afinidad por ligandos oxígeno- donantes	Absorción baja pero acumulativa; excreción renal lenta; depósitos en SNC	Residuos industriales, plantas de tratamiento deficientes	Presencia en aguas cercanas a descargas industriales	Promueve acumulación de beta-amiloide y tau, implicado en procesos neurodegenerativos. (11-12)
---------------	---	---	---	--	--

Tabla 2. Perfil neurotóxico específico de los metales pesados

Metal pesado	Clasificación química	Toxicocinética	Neurotoxicidad
Plomo (Pb)	Clase B – afinidad por ligandos azufre- donantes	Alta absorción GI; cruza BHE; acumulación en hueso y SNC; excreción lenta	Afecta neuronas de Purkinje, hipocampo y sustancia nigra; altera coordinación motora, sinapsis y plasticidad; mimetiza calcio y genera radicales libres; interfiere con calmodulina y cinasa C; asociado a déficit cognitivo, depresión, ansiedad, agresividad y conductas antisociales. ⁽¹³⁻¹⁸⁾
Mercurio (Hg)	Clase B – afinidad por ligandos azufre- donantes	Liposoluble; cruza BHE; afinidad por selenio; se acumula en cerebro	Forma elemental cruza BHE y se acumula en SNC; promueve daño oxidativo y se asocia con Alzheimer y trastornos neurodegenerativos. ⁽¹⁹⁾
Aluminio (Al)	Clase A – afinidad por ligandos oxígeno- donantes	Absorción baja pero acumulativa; lenta excreción renal; se deposita en SNC	Induce acumulación de beta-amiloide y tau; estrés oxidativo; altera homeostasis de hierro y calcio; implicado en Alzheimer, ELA y síndromes parkinsonianos. ⁽²⁰⁾
Cadmio (Cd)	Clase B – afinidad por ligandos azufre- donantes	Absorción digestiva moderada; acumulación en hígado, riñón y plexo coroideo	Genera ROS, altera enzimas antioxidantes y peroxidación lipídica; activa apoptosis por vía mitocondrial (MAPK, mTOR); interfiere con homeostasis de Ca ²⁺ , Zn y Cu; potencial para efectos epigenéticos y deterioro neurogénico. ⁽²¹⁾

Tabla 3. Enfermedades neurodegenerativas

Enfermedad	Descripción clínica	Mecanismo neuropatológico principal
Alzheimer	Deterioro progresivo de la memoria y funciones cognitivas, frecuente en adultos mayores.	Acumulación de placas seniles de β -amiloide extracelular y marañas neurofibrilares intracelulares de proteína tau hiperfosforilada. ⁽²²⁾
Parkinson	Trastorno del movimiento; temblor, rigidez y bradicinesia por pérdida de dopamina.	Degeneración de neuronas dopaminérgicas en la sustancia negra y acumulación de cuerpos de Lewy con α -sinucleína, sinfilina-1 y proteínas de la vía de ubiquitina-proteasoma. ⁽²³⁾
Esclerosis múltiple	Enfermedad autoinmune desmielinizante con síntomas motores, visuales y sensoriales.	Ataque inmunitario a oligodendrocitos por linfocitos T CD8, B y macrófagos; producción de radicales libres, glutamato y anticuerpos que destruyen la mielina. ⁽²⁴⁾
Huntington	Trastorno hereditario progresivo con alteraciones conductuales, cognitivas y movimientos espasmódicos.	Mutación autosómica dominante en el cromosoma 4 que causa degeneración de neuronas en el núcleo caudado y putamen. ⁽²²⁾
Esclerosis lateral amiotrófica (ELA)	Enfermedad degenerativa progresiva que afecta motoneuronas; produce debilidad muscular y atrofia.	Muerte selectiva de neuronas motoras por estrés oxidativo, disfunción mitocondrial, excitotoxicidad por glutamato y activación microglial. ⁽²²⁾

Tabla 4. Relación entre metales pesados y enfermedades neurodegenerativas

Metal pesado	Mecanismos neurotóxicos principales	Enfermedades neurodegenerativas asociadas
---------------------	--	--

Plomo (Pb)	Interferencia con el metabolismo del calcio; disfunción mitocondrial; producción de radicales libres; alteración de la calmodulina y cinasa C; daño sináptico; acumulación en neuronas motoras y estructuras límbicas; neuroinflamación sostenida.	Enfermedad de Alzheimer (déficit cognitivo por estrés oxidativo y daño mitocondrial); Enfermedad de Parkinson (alteración dopaminérgica); trastornos afectivos y conductuales que pueden simular estadios precoces de ELA o Huntington. ^(13,14,15,18)
Mercurio (Hg)	Alta liposolubilidad que le permite atravesar la barrera hematoencefálica; acumulación cerebral por afinidad con el selenio; estrés oxidativo; inhibición enzimática; alteración de la neurotransmisión y disfunción sináptica; daño neuronal por metilación intracelular.	Enfermedad de Alzheimer (acumulación prolongada en tejido nervioso y asociación con placas amiloides); Enfermedad de Parkinson (daño mitocondrial y alteración dopaminérgica); ELA (neuroinflamación y muerte neuronal selectiva). ^(3,19)
Aluminio (Al)	Inducción de agregados de beta-amiloide y proteína tau; alteración del metabolismo del hierro y calcio; generación de estrés oxidativo; daño sináptico; disrupción de la plasticidad neuronal y muerte celular programada.	Enfermedad de Alzheimer (involucrado en la formación de placas seniles y ovillos neurofibrilares); Esclerosis lateral amiotrófica (ELA) y síndromes parkinsonianos atípicos por disfunción sináptica y estrés oxidativo prolongado. ^(12,20)
Cadmio (Cd)	Generación de especies reactivas de oxígeno (ROS); activación de las vías de señalización MAPK/mTOR; alteración del metabolismo de metales esenciales (Zn, Cu); interferencia con la homeostasis del calcio; apoptosis inducida por disfunción mitocondrial; alteración de la barrera hematoencefálica.	Esclerosis múltiple (afectación de la microvasculatura cerebral y del sistema antioxidante); ELA (activación de mecanismos apoptóticos similares a los descritos en la motoneurona); deterioro de la neurogénesis y potenciales alteraciones epigenéticas persistentes. ^(9,21)

DISCUSIÓN

La evidencia acumulada a lo largo de las últimas décadas ha permitido consolidar el conocimiento acerca de los efectos neurotóxicos de los metales pesados, particularmente en lo concerniente a su asociación con diversas enfermedades neurodegenerativas. Entre estos metales, el plomo (Pb), el mercurio (Hg), el aluminio (Al) y el cadmio (Cd) han sido señalados consistentemente como agentes etiopatogénicos en procesos neurodegenerativos, dada su capacidad de alterar la homeostasis neuronal, inducir estrés oxidativo y comprometer estructuras cerebrales específicas involucradas en funciones cognitivas, motoras y conductuales.

El plomo, considerado históricamente como uno de los contaminantes ambientales más persistentes, presenta una especial afinidad por el tejido nervioso en desarrollo. Hoffer, Olson y Palmer en 1987 demostraron que la exposición perinatal a plomo altera de forma permanente la descarga espontánea de las neuronas de Purkinje en el cerebelo, sin afectar a las mismas células en el tejido adulto. Este hallazgo, respaldado por técnicas electrofisiológicas y morfohistológicas en modelos experimentales *in oculo*, subraya la vulnerabilidad del sistema nervioso inmaduro a dosis que no tendrían efecto en organismos adultos. Asimismo, esta toxicidad estructural y funcional se extiende a regiones como el hipocampo y la sustancia negra, cuyos procesos de crecimiento y organización se ven alterados bajo exposición crónica a plomo en etapas tempranas del desarrollo. ⁽¹³⁾

Desde un enfoque molecular, se ha identificado que el plomo interfiere con mecanismos intracelulares claves. La sustitución del calcio mitocondrial por plomo promueve la generación de especies reactivas de oxígeno (ROS), lo que deriva en apoptosis y disfunción mitocondrial progresiva ⁽¹⁴⁾. Esta alteración se ve acentuada por la disrupción de la calmodulina, proteína reguladora del sistema de señalización neuronal, cuya disfunción afecta la memoria, la neuroplasticidad y el crecimiento axonal. ⁽¹⁵⁻¹⁶⁾ De igual modo, el plomo se ha vinculado con alteraciones del sistema neurotransmisor GABAérgico, dopaminérgico y colinérgico, facilitando la aparición de trastornos afectivos, ansiedad, irritabilidad y conductas antisociales. ⁽¹⁷⁻¹⁸⁾

Respecto al mercurio, se ha establecido que su forma elemental, al ser liposoluble, tiene la capacidad de atravesar la barrera hematoencefálica y acumularse en el tejido cerebral, generando efectos a largo plazo sobre la función neuronal. Mutter y otros autores en el año 2005, identificaron que la exposición crónica a mercurio, particularmente en su forma orgánica, puede inducir disfunción mitocondrial y acumulación de proteínas neurotóxicas como la beta-amiloide, lo que sugiere un papel potencial del mercurio en la patogénesis de enfermedades como el Alzheimer. El estudio muestra una correlación significativa entre la carga de mercurio en el tejido cerebral y los niveles de péptido β -amiloide, lo

cual refuerza la hipótesis de que la exposición ambiental podría ser un factor facilitador en la aparición de este tipo de demencia. ⁽²⁵⁾

El aluminio, otro metal con gran presencia ambiental, ha sido señalado como factor coadyuvante en procesos neurodegenerativos. Kawahara plantea que el aluminio puede inducir acumulación de proteínas tau y beta-amiloide, promover apoptosis neuronal y alterar la homeostasis de hierro y calcio en el sistema nervioso ⁽²⁰⁾. Estos efectos, si bien aún están en investigación, han sido reportados también por Echeverría-García, quien destaca su implicación en la esclerosis lateral amiotrófica y otros síndromes parkinsonianos. Tales hallazgos sugieren una convergencia mecánica entre la exposición crónica a aluminio y la aparición de enfermedades neurodegenerativas asociadas con disfunción sináptica y estrés oxidativo. ⁽¹¹⁾

Por su parte, el cadmio (Cd), aunque no se acumula en grandes cantidades en el sistema nervioso central, actúa como disruptor indirecto del metabolismo de metales esenciales como el zinc y el cobre. Wang y Du en 2013 documentaron que este metal genera especies reactivas de oxígeno, induce apoptosis neuronal a través de vías como MAPK y mTOR, y altera la homeostasis del calcio intracelular, afectando la señalización sináptica. Esta acumulación de daño oxidativo ha sido vinculada con deterioro en la neurogénesis, alteraciones epigenéticas y procesos patológicos similares a los observados en trastornos neurodegenerativos como el Parkinson o la esclerosis múltiple. ⁽²¹⁾

Finalmente, el conjunto de hallazgos examinados apunta a una relación coherente entre la exposición prolongada a metales pesados y la aparición de alteraciones neuropatológicas compatibles con entidades clínicas como la enfermedad de Alzheimer, Parkinson, esclerosis múltiple, esclerosis lateral amiotrófica y enfermedad de Huntington. ⁽²²⁻²⁴⁾ La presencia de agregados proteicos anormales, disfunción mitocondrial y muerte celular programada constituyen mecanismos compartidos que podrían ser inducidos o acelerados por la exposición a dichos agentes ambientales.

Conclusiones

La evidencia recopilada en este estudio confirma la estrecha relación entre la exposición a metales pesados, como plomo, mercurio, aluminio y cadmio, y el desarrollo de enfermedades neurodegenerativas. Estos metales no solo atraviesan la barrera hematoencefálica, sino que también generan daños celulares profundos, como el estrés oxidativo, la disrupción del metabolismo del calcio y la inducción de la apoptosis. Estos mecanismos contribuyen significativamente al deterioro neurológico y la aparición de enfermedades como el Alzheimer, Parkinson, y otras condiciones neurodegenerativas.

Este estudio subraya la necesidad de continuar investigando la relación entre la exposición a metales pesados y las enfermedades neurodegenerativas. Asimismo, destaca la importancia de la educación pública para sensibilizar a la población sobre los riesgos asociados a estos metales. Solo mediante un esfuerzo conjunto de la comunidad científica, las autoridades y la sociedad en general se podrán avanzar en la prevención de estas enfermedades debilitantes y mejorar la calidad de vida de las futuras generaciones.

Author Contributions: Conceptualization, María Emilia Sánchez Rodríguez, Ivan Cedeño Santos, Denise Contreras Zapata.; met-hodology, María Emilia Sánchez Rodríguez, Ivan Cedeño Santos, Denise Contreras Zapata.; formal analysis, María Emilia Sánchez Rodríguez, Ivan Cedeño Santos, Denise Contreras Zapata.; investigation, María Emilia Sánchez Rodríguez, Ivan Cedeño Santos, Denise Contreras Zapata; visualization, Denise Contreras Zapata; project administration, María Emilia Sánchez Rodríguez, Ivan Cedeño Santos, Denise Contreras Zapata.; funding acquisition, María Emilia Sánchez Rodríguez, Ivan Cedeño Santos, Denise Contreras Zapata. Fondos: María Emilia Sánchez Rodríguez, Ivan Cedeño Santos, Denise Contreras Zapata.

Funding: This research received no external funding

Conflicts of Interest: Declare conflicts of interest or state, "The authors declare no conflict of interest."

Referencias bibliográficas

1. Organización Mundial de la Salud. Informe sobre la contaminación del agua y la salud pública. Ginebra: OMS; 2023.
2. Li H, Yang X, Wang W. Environmental exposure and inequalities in global health: a narrative review of current knowledge and future research directions. *Int J Environ Res Public Health*. 2021;18(4):1482. doi:10.3390/ijerph18041482.
3. Echevarría G, Lujan NK, Montoya J, Granda-Albuja MG, Valdiviezo-Rivera J, Sánchez F, et al. Abiotic and biotic factors influencing heavy metals pollution in fisheries of the Western Amazon. *Sci Total Environ*. 2024;908:168506. doi:10.1016/j.scitotenv.2023.168506.
4. Karri V, Schuhmacher M, Kumar V. Heavy metals (Pb, Cd, As and MeHg) as risk factors for cognitive dysfunction: a general review of metal mixture mechanism in brain. *Environ Toxicol Pharmacol*. 2016;48:203-13. doi:10.1016/j.etap.2016.10.007.
5. Mora A, Jumbo-Flores D, González-Merizalde M, Bermeo-Flores SA. Niveles de metales pesados en sedimentos de la cuenca del río Puyango, Ecuador. *Rev Int Contam Ambient*. 2016;32(4):385-97.

6. Pernía B, Mero M, Cornejo X, Ramírez N, Ramírez L, Bravo K, et al. Determinación de cadmio y plomo en agua, sedimento y organismos bioindicadores en el Estero Salado, Ecuador. Enfoque UTE. 2018;9(2):89-105.
7. Periodistas Sin Cadenas. La contaminación minera en Ecuador amenaza a miles de habitantes de Perú. Periodistas Sin Cadenas. 2022 Sep 26. Available from: <https://www.periodistassincadenas.org/contaminacion-minera-ecuador-peru>.
8. Muyulema-Allaica JC, Canga-Castillo SM, Pucha-Medina PM, Espinosa-Ruiz CG. Evaluación de la contaminación por metales pesados en suelos de la Reserva Ecológica de Manglares Cayapas Mataje (REMACAM)-Ecuador. RIIIT Rev Int Investig Innov Tecnol. 2019;7(41):40-61.
9. Pozo-Miranda F. Presencia de metales pesados cadmio y plomo en el estuario del río Chone, Manabí, Ecuador. Rev Cienc UNEMI. 2017;10(24):123-30.
10. Ferrer A. Intoxicación por metales. An Sist Sanit Navar. 2003;26(Supl 1):141-53. Available from: http://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1137-66272003000200008
11. Echeverría-García A. Metales pesados en suelos, ¿cómo nombrarlos y analizarlos? Rev Cienc Ambient. 2024;19(1):15-22.
12. Ramírez A. Biomarcadores en monitoreo de exposición a metales pesados en metalurgia. An Fac Med. 2006;67(1):49-58.
13. Hoffer BJ, Olson L, Palmer MR. Toxic effects of lead in the developing nervous system: in oculo experimental models. Neurotoxicology. 1987;8(3):425-40.
14. Goldstein GW, Asbury AK, Diamond I. Pathogenesis of lead encephalopathy: role of cerebrovascular permeability. Environ Health Perspect. 1993;89:37-43.
15. Costa LG, Cole TB, Furlong CE. Paraoxonase (PON1): from toxicology to cardiovascular medicine. Acta Biomed. 2004;75(2):50-6.
16. Nour Eddine D, Lenoir D, Rondeau V. Calcium signaling and neurotoxicity of environmental pollutants. Cell Mol Neurobiol. 2005;25(3-4):471-9.
17. Rhodes D, Spiro A, Aro A. Low-level lead exposure and depression and phobic anxiety: a longitudinal study of middle-aged and older men. Am J Epidemiol. 2003;157(4):335-8. doi:10.1093/aje/kwf205.
18. Carpenter DO, Arcaro K, Spink DC. Understanding the human health effects of chemical mixtures. Environ Health Perspect. 2010;110(S1):25-42.
19. Mutter J, Curth A, Naumann J, Deth R, Walach H. ¿Influye el mercurio inorgánico en la enfermedad de Alzheimer? Una revisión sistemática y un mecanismo molecular integrado. J Alzheimers Dis. 2010;22(2):357-74.

20. Kawahara M. Effects of aluminum on the nervous system and its possible link with neurodegenerative diseases. *J Alzheimers Dis.* 2005;8(2):171-82. doi:10.3233/JAD-2005-8210.
21. Wang B, Du Y. Cadmium and its neurotoxic effects. *Oxid Med Cell Longev.* 2013;2013:898034. doi:10.1155/2013/898034.
22. Angoa Pérez M, Rivas Arancibia S. Estrés oxidativo y neurodegeneración: ¿causa o consecuencia? *Arch Neurocienc.* 2006;12(1):45-54. Available from: <https://www.researchgate.net/profile/Selva-Rivas-Arancibia/publication/228503841>
23. Chaves Morales KP, Padilla Elizondo DS, Vargas Fernández R. Enfermedad de Parkinson. *Rev Med Sinergia.* 2022;7(2):e758. doi:10.31434/rms.v7i2.758
24. Altarriba MCM, Ramos Campoy O, Calcaño IML, Arrieta Antón E. Revisión de la esclerosis múltiple (1). *Semergen.* 2015;41(7):381-7. doi:10.1016/j.semerg.2014.07.009
25. Mutter J, Naumann J, Schneider R, Walach H, Haley B. Mercury and Alzheimer's disease. *J Alzheimers Dis.* 2005;8(4):383-93. doi:10.3233/JAD-2005-8210

/Received: [12 diciembre 2025] | Accepted: [4 febrero 2026] | Published: [15 marzo 2026] |

Citation: Contreras Zapata, D; Sánchez Rodríguez, M; Cedeño Santos, I; Metales pesados y salud neurológica: una revisión sobre su efecto acumulativo y riesgos para la salud pública. *Bionatura* 2026. Volumen 11, (No 1). <https://doi.org/10.70373/RB/2026.11.01.4>

Peer review information: Bionatura thanks the anonymous reviewers for their contribution to the peer review of this work using <https://reviewerlocator.webofscience.com/>

All articles published by Bionatura Journal are freely and permanently accessible online immediately after publication, without subscription charges or registration barriers.

Publisher's Note: Bionatura stays neutral concerning jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license

(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Using L-arginine hydrochloride as a preservative for polymerase enzymes in room temperatures

Dr. Joseph Shenekji ^{*1}, Antonius AL-Daoud ², Abduljalil Ghrewati ¹

¹Faculty of technical Engineering - Dept. of Biotechnology Engineering, University of Aleppo, Syria
josephshenekji94@gmail.com <https://orcid.org/0009-0004-0683-1830> - drghrewati@gmail.com

²Atomic Energy Commission of Syria, Dept of Biotechnology, Damascus, Syria.
aaldaoude@gmail.com

*Correspondence: josephshenekji94@gmail.com ;

<https://doi.org/10.70373/RB/2026.11.01.5>

Abstract

The preservation of DNA polymerases under ambient conditions remains a significant challenge, particularly in regions with limited access to cold storage. This study investigates the efficacy of L-arginine hydrochloride as a stabilizing agent for Pfu polymerase and polymerase mixtures stored in a 20 ul aliquots at different temperatures over 3 months. Enzyme activity was assessed via polymerase chain reaction (PCR) amplification of a 1250 base pair fragment. Results showed that Pfu polymerase retained enzymatic function when stored at 4°C, 25°C, and 37°C in the presence of 1M L-arginine hydrochloride, whereas enzyme activity was lost at 37°C without the stabilizer. The addition of L-arginine hydrochloride also enhanced the stability of Taq polymerase and Pfu + Taq mixtures, although to a lesser extent. Mechanistically, L-arginine hydrochloride likely prevents protein aggregation, improves solubility, and stabilizes enzyme structure through electrostatic interactions. These findings demonstrate the potential of L-arginine hydrochloride as an effective polymerase stabilizer, reducing dependency on cold chain logistics, thereby making molecular diagnostics and research more accessible in low-resource settings. This study advances the state of the art by providing an alternative enzyme preservation method that could lower costs and improve access to essential biochemical reagents in both clinical and research applications. Future work will focus on optimizing concentration conditions, assessing long-term stability beyond three months, and expanding the investigation to other thermostable polymerases.

Keywords

L-arginine hydrochloride, enzymes, polymerases, storage, Pfu, LAH

Introduction

Arginine which is in the form of L-arginine, is a vital amino acid, has emerged as a significant agent in preserving polymerase enzymes, particularly at room temperature, which addresses the critical need for stable biochemical reagents in research and industrial applications as mentioned by Pal et al. (2012).¹

Its unique properties as a cationic preservative not only inhibit microbial growth but also enhance the stability and functional lifespan of polymerases, essential for nucleic acid synthesis and various biochemical processes according to Sepahi et al. (2017).²

This makes L-arginine and its derivatives, such as L-arginine hydrochloride (LAH) or arginine ethyl ester (LAE), notable in both food and pharmaceutical industries, where the maintenance of enzyme activity and product safety is paramount, as found by Zhao et al. (2024).³

The fact that arginine is natural amino acid in living organisms, makes it a favorable alternative to traditional preservatives, often associated with health concerns, by providing effective antimicrobial action without adverse effects on human health, in accordance to Bijle et al. (2021)⁴. The recommended usage concentrations of arginine derivatives vary, allowing flexibility across different applications, from food preservation to enzyme storage solutions, as said by Bijle et al. (2019).⁵

Research indicates that L-arginine derivatives significantly improve the storage stability of polymerase enzymes, permitting effective preservation at ambient temperatures, which could reduce reliance on low-temperature storage methods as it appeared with Arakawa et al. (2007)⁶. Which can help in providing the polymerase enzymes to low and middle-income countries for research purposes and development in biotechnology, and at the same time create a fairer distribution of molecular reagents and diagnostics in times of medical urgencies such as covid-19, where PCR reagents shipments and vaccines were challenging because of the need of cold chain supply that poses several challenges such as: Logistical Constraints that requires specialized equipment including freezers for -20°C, refrigerators, and cold packs. In many regions, particularly in developing countries, access to such infrastructure may be limited or unreliable. Transportation Difficulties and the challenging efforts to reach remote or underserved areas. finally, this preservation method could benefit with the environmental aspect, as it reduces the need of refrigeration in labs and cold-chain freight or regular shipment, as learned from Kim et al. (2016).⁷

Despite the promise shown by arginine-based preservatives, debates persist regarding their long-term efficacy and comparative advantage over synthetic alternatives. As research continues to explore the various applications and mechanisms of action, the role of L-arginine as a preservative highlights

both its practical benefits and the need for ongoing investigation into its safety and effectiveness in diverse environments, this was mentioned by Agrillo et al. (2023).⁸

Materials and methods

Enzyme Preparation and preservation

Pfu DNA polymerase (1 unit/μl) was obtained from a locally manufactured enzyme in the AECS, expressed from a plasmid that was a gift from open bioecconomy lab in the university of cambridge called Pobl1 mentioned in Bhadra et al. (2021)⁹, it produces open vent enzyme, one of pfu polymerase derivatives.

20 μl aliquots of the Pfu polymerase were prepared in the presence or absence of 1M LAH (USB corporation), Control aliquots containing only Pfu polymerase were prepared as a reference, along with a mixture of 1:1 pfu and taq polymerase (genedirex), and taq polymerase alone. All aliquots were stored at 37°C, 2-8°C, 25°C for up to three months, and Control aliquots were stored at -20°C as a reference for optimal activity, all shown in table 1.

TABLE 1: A general resemblance of the temperatures, period, polymerases, and preservatives tested.

Temperature / enzyme	Taq+Pfu	Pfu	Taq	Storage duration
37°C	With LAH	With LAH	With LAH	3 months
	NO LAH	NO LAH	NO LAH	
25°C	With LAH	With LAH	With LAH	
	NO LAH	NO LAH	NO LAH	
2-8°C	With LAH	With LAH	With LAH	
	NO LAH	NO LAH	NO LAH	
-20°C	With LAH	With LAH	With LAH	

*LAH: L-arginine hydrochloride

Enzyme Activity Assay

PCR amplification of a specific DNA fragment sized 1250 bp which is a part from a gift plasmid called Pobl6 from open bioecconomy lab, was performed using 1 μl of Pfu polymerase from each storage condition.

Standard PCR conditions were employed, including the mix, program, and primer pair we designed using Benchling platform, all shown in table 2,3,4 respectively.¹⁰

Table 2: PCR mix components used for amplifying DNA templates.

Component	Volume (µl)
dNTPs	1.5
PCR buffer 10x	2.5
MgCl ₂	1.5
Primer F	1
Primer R	1
DNA template	1
DMSO*	1
DNA polymerase	1
dH ₂ O	14.5
Total Volume	25

*DMSO is optional, but it can provide better results.

Table 3: PCR program used for amplifying 1250 bp amplicon.

Stage	Temperature	Time	Cycles
Initial Denaturation	95°C	5 min	1
Denaturation	95°C	1 min	35
Annealing	58°C	40 sec	
Extension	72°C	1 min	
Final Extension	72°C	7 min	1
Storage	4°C	∞	1

*PCR program was optimized for best results.

Table 4: primer pairs used in the PCR.

primer	sequence	location on Pobl6	melting temperature (°C)	% GC	length (bp)
forward	5'	3312-3332	60.9	57%	21
	CGGCGTAGAGGATCGAGATCT				
reverse	3'	5852-5872	58.4	52%	21
	5' GTGAAGGAGATCATCTTGCCC				

* primers were designed using Benchling Primers Wizard.

Gel Electrophoresis

PCR products were separated by agarose gel electrophoresis (1% agarose) and visualized using ethidium bromide staining, with DNA ladder marker 1Kb RTU (Vivantis), Gel images were captured using a gel documentation system (UVP GelDocIT). The relative activity of the enzyme was determined by comparing the band presence of PCR products obtained using enzyme stored the 3 previously mentioned temperatures, with the 3 types of enzymes or enzymes mix, with and without arginine to that of the control enzyme stored at -20°C.

Results

Three-Month Shelf Life Test Without L-Arginine Hydrochloride

To assess enzyme stability in the absence of L-arginine hydrochloride, PCR amplification was performed using enzymes stored without a preservative under the same conditions, and result were as mentioned here:

Storage at 4°C showed that The Pfu polymerase enzyme created a ppositive amplification in sample 1, The Pfu + Taq mixture in sample 2, and Taq polymerase alone in sample 3 also retained enzymatic activity. Storage at Room Temperature 25°C revealed that The Pfu polymerase enzyme retained its activity and produced a positive amplification band in sample 4, The Pfu + Taq enzyme mixture in sample 5 , but the Taq lone in sample 6 showed no amplification. Storage at 37°C displayed that None of the enzymes, including Pfu polymerase, the Pfu + Taq mixture, or Taq polymerase alone, gave any amplification after three months at 37°C provided in samples 7, 8, and 9. These results indicate that enzyme degradation occurs at higher temperatures in the absence of a stabilizer. Previous results are displayed in Figure 1.

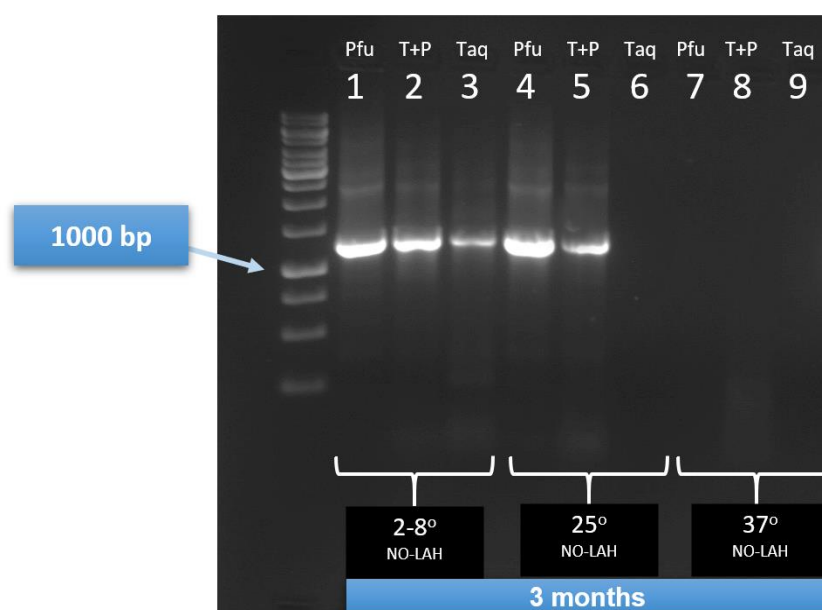


Figure 1. Agarose gel 1% electrophoresis result of amplifications using enzymes stored for 3 months without L-arginine hydrochloride (LAH)

Three-Month Shelf Life Test with L-Arginine Hydrochloride

The shelf life of the polymerase enzymes was assessed by storing them for 3 months with 1M of L-arginine hydrochloride as a preservative, followed by PCR amplification of a 1250 bp target fragment. results came as follows:

Storage at 4°C showed that The Pfu polymerase enzyme had a successful amplification, as seen in sample 10, while the Pfu + Taq mixture in sample 11 and Taq polymerase alone in sample 12 also showed positive results. Storage at Room Temperature 25°C, The Pfu polymerase enzyme produced a postive amplification band in sample 13. The Pfu + Taq enzyme mixture in sample 14 showed successful amplification. A positive amplification was observed in sample 15, which contained Taq polymerase alone. With Storage at 37°C, it appeared that The Pfu polymerase enzyme and mixtures of Taq+Pfu and Taq alone maintained activity and produced a clear amplification band as shown in samples 16, 17, 18 respectively. All these results are shown in **Figure 2**.

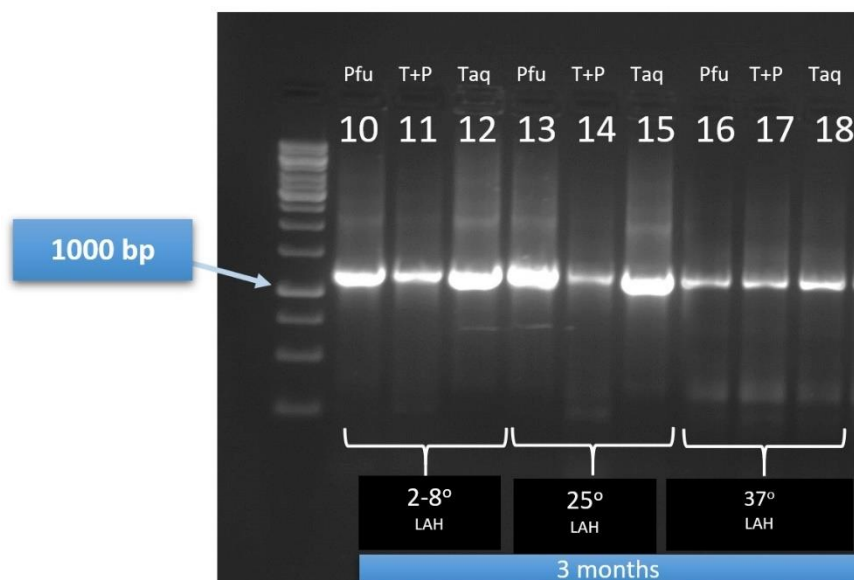


Figure 2. agarose gel 1% electrophoresis result of amplifications using enzymes stored for 3 months with L-arginine hydrochloride (LAH).

1.1 Three-Month Viability Test with L-Arginine Hydrochloride at -20°C

To evaluate enzyme viability under freezer storage conditions, PCR was performed on the 1250 bp target fragment using enzymes stored at -20°C. Enzymes Without L-Arginine Hydrochloride -20°C beginning with Pfu polymerase enzyme retained activity in sample 22, The Pfu + Taq mixture in sample 23 and Taq polymerase alone in sample 24 also produced successful amplifications. With L-Arginine Hydrochloride -20°C; The Pfu polymerase enzyme retained activity in sample 25, also The Pfu + Taq mixture in sample 26 and Taq polymerase alone in sample 27 also showed positive results. See Figure 3 for these electrophoresis results.

A commercial 1 ul Pfu enzyme (Vivantis) used as positive control stored at -20°C was tested and produced a faint amplification band sample 21. A reaction using the locally produced Pfu polymerase without a template DNA as a negative control yielded no amplification symbolized “-VE1” in sample 19 and another negative control that had the commercial Pfu (Vivantis) without a DNA template symbolized “-VE2” in sample 20 gave also no result amplification, confirming the absence of contamination. Results are provided visually in Figure 3.

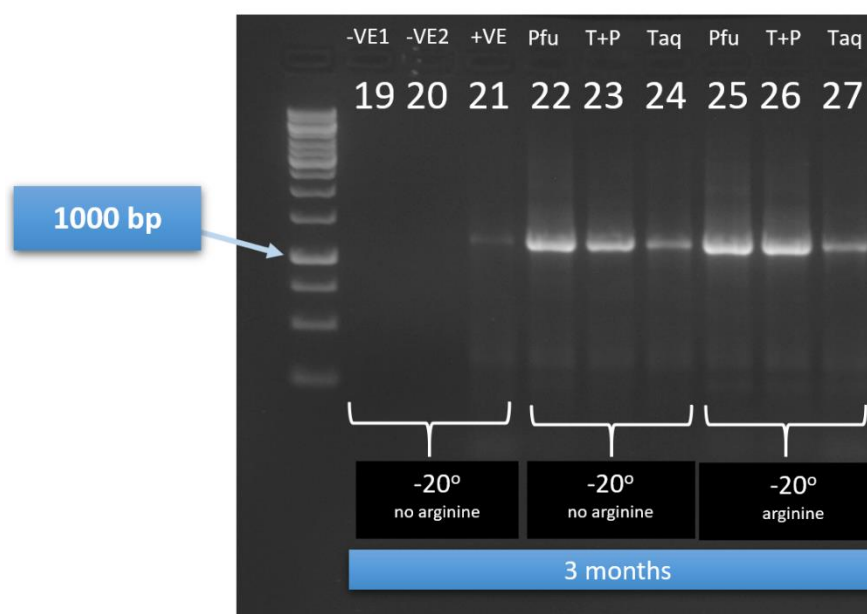


Figure 3. agarose gel 1% electrophoresis result of amplifications using positive and negative controls.

Discussion

Suggested mechanisms of L-Arginine Hydrochloride plays in Protein thermostability

L-arginine hydrochloride has been widely recognized for its role in enhancing protein stability through multiple molecular mechanisms, which contribute to reducing aggregation, improving solubility, and maintaining structural integrity in accordance with Hao *et al.* (2022)¹¹. The principal mechanisms by which L-arginine hydrochloride stabilizes proteins are as follows:

- **Prevention of Protein Aggregation:** L-arginine hydrochloride effectively mitigates protein aggregation by interfering with protein-protein interactions, thereby ensuring that active sites remain exposed. This interference prevents the formation of misfolded or inactive protein structures, promoting the retention of the native functional conformation, in accordance to Haskins *et al.* (2016).¹²
- **Enhancement of Protein Solubility:** The solubility of numerous proteins, particularly those with intrinsically poor solubility, is significantly improved in the presence of L-arginine hydrochloride. Even at low concentrations, L-arginine hydrochloride has been shown to increase protein solubility, which in turn enhances overall stability approving results of Tsumoto *et al.* (2004).¹³
- **Molecular Interactions and Structural Stabilization:** The guanidinium group present in L-arginine hydrochloride plays a critical role in protein stabilization by interacting with

hydrophobic regions of proteins. This interaction effectively shields these hydrophobic regions, reducing the energetic cost associated with their exposure and thereby stabilizing the protein structure concurring with Steven et al. (2023).¹⁴

- **Thermal Stabilization:** Experimental studies have demonstrated that L-arginine hydrochloride can increase the thermal stability of proteins, as evidenced by its ability to elevate the assembly temperature of proteins such as insulin. However, this effect has yet to be investigated in thermostable enzymes such as Pfu polymerase, which may exhibit different stabilization requirements as mentioned by Platt et al. (2015).¹⁵
- **Competitive Water Binding and Hydrolysis Resistance:** L-arginine hydrochloride competes with water molecules for interactions with proteins, thereby increasing the energy barrier for hydrolytic degradation. This competitive binding mechanism enhances overall protein stability by reducing susceptibility to hydrolysis and denaturation as described by Strub et al. (2004).¹⁶
- **Electrostatic Interactions and Charge Stabilization:** The presence of positively charged amino groups in L-arginine hydrochloride facilitates electrostatic interactions with negatively charged regions of proteins. These interactions contribute to the formation of stabilizing electrostatic bonds, which reinforce structural integrity and minimize the risk of conformational changes induced by environmental fluctuations. Like mentioned by Baynes et al. (2005).¹⁷

Taken together, these mechanisms highlight the multifaceted role of L-arginine hydrochloride as a stabilizing agent, particularly in preserving enzyme functionality under stress conditions. Further investigations are warranted to explore its potential effects on thermostable DNA polymerases, such as Pfu, under varying storage conditions.

1.1.1 Effect of L-Arginine Hydrochloride on Enzyme Stability

The results clearly demonstrate that L-arginine hydrochloride enhances the thermal stability of Pfu polymerase, allowing it to remain active even under elevated temperatures (37°C) for three months. Without L-arginine hydrochloride, enzyme activity was completely lost at 37°C. But With L-arginine hydrochloride, the Pfu polymerase enzyme retained activity at both 25°C and 37°C, suggesting stabilization against thermal degradation. These findings align with the study by Hada et al. (2023)¹⁸, which reported that L-arginine prevents protein aggregation, thereby maintaining enzyme function over time.

Pfu polymerase exhibited the highest resistance to degradation, particularly in the presence of L-arginine hydrochloride. Pfu+Taq mixtures showed moderate stability, with partial loss of activity at elevated temperatures. Taq polymerase alone exhibited the least stability, failing to amplify DNA at room temperature (25°C) or 37°C without a preservative.

This suggests that while L-arginine hydrochloride is an effective stabilizer, its efficacy varies depending on the enzyme type and its intrinsic thermal resistance.

Conclusions

This study provides a proof-of-concept for the use of LAH as a stabilizing agent for polymerases. Findings in this study have significant implications for enzyme preservation in low-resource settings where cold storage facilities may be limited. The ability to store polymerase enzymes at room temperature or even elevated temperatures (37°C) using 1M L-arginine hydrochloride could Reduce cold chain dependency for enzyme storage, Enable on-site PCR diagnostics in regions with limited refrigeration, and Lower costs associated with enzyme importation and storage.

Supplementary Materials: all needed materials to duplicate this research are available in the article, in case of further information, contact the correspondant autor.

Author Contributions: all authors contributed equally in this research.

Funding: This research was funded from the high commission of scientific research in syria, contract NO. 2 in 2021.

Data Availability Statement: all needed data are available in the article, in case of further information, contact the correspondant autor.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgments: We thank Dr. Jennifer Molloy from Openbioeconomy lab in the university of cambridge for providing the Plasmid used in this study.

References [Vancouver]

1. Pal S, Das M, Dasgupta D (2012) Structural studies of arginine-induced enhancement in the activity of T7 RNA polymerase. *Biochem. Biophys. Res. Commun.* 421(1):27-32.

2. Sepahi M, Jalal R, Mashreghi M (2017) Antibacterial activity of poly-L-arginine under different conditions. *Iran. J. Microbiol.* 9(2):103.
3. Zhao Z, Wen SA, Song N, Wang L, Zhou Y, Deng X, Wu C, Zhang G, Chen J, Tian GB, Liang M (2024) Arginine-enhanced antimicrobial activity of nanozymes against Gram-negative bacteria. *Adv. Healthc. Mater.* 13(4):2301332.
4. Bijle MN, Pichika MR, Mak KK, Parolia A, Babar MG, Yiu C, Daood U (2021) Concentration-dependent multi-potentiality of L-arginine: Antimicrobial effect, hydroxyapatite stability, and MMPs inhibition. *Molecules* 26(21):6605.
5. Bijle MN, Ekambaram M, Lo EC, Yiu CK (2019) The combined antimicrobial effect of arginine and fluoride toothpaste. *Sci. Rep.* 9(1):8405.
6. Arakawa T, Ejima D, Tsumoto K, Obeyama N, Tanaka Y, Kita Y, Timasheff SN (2007) Suppression of protein interactions by arginine: a proposed mechanism of the arginine effects. *Biophys. Chem.* 127(1-2):1-8.
7. Kim NA, Hada S, Thapa R, Jeong SH. Arginine as a protein stabilizer and destabilizer in liquid formulations. *International Journal of Pharmaceutics.* 2016 Nov 20;513(1-2):26-37.
8. Agrillo B, Porritiello A, Gratino L, Balestrieri M, Proroga YT, Mancusi A, Cozzi L, Vicenza T, Dardano P, Miranda B, Escribá PV (2023) Antimicrobial activity, membrane interaction and structural features of short arginine-rich antimicrobial peptides. *Front. Microbiol.* 14:1244325.
9. Bhadra S, Nguyen V, Torres JA, Kar S, Fadanka S, Gandini C, Akligoh H, Paik I, Maranhao AC, Molloy J, Ellington AD (2021) Producing molecular biology reagents without purification. *PLoS One* 16(6):e0252507.
10. Davies K (2020) From the bench to Benchling. *GEN Edge* 2(1):303-9.
11. Hao M, Cui R, Zhu X, Han L, Zhou Z, Liu Z (2022) Improving the activity and synergistic catalysis of L-aspartate β -decarboxylase by arginine introduction on the surface. *Catal. Sci. Technol.* 12(17):5281-9.
12. Haskins N, Mumo A, Brown PH, Tuchman M, Morizono H, Caldovic L (2016) Effect of arginine on oligomerization and stability of N-acetylglutamate synthase. *Sci. Rep.* 6(1):38711.
13. Tsumoto K, Umetsu M, Kumagai I, Ejima D, Philo JS, Arakawa T (2004) Role of arginine in protein refolding, solubilization, and purification. *Biotechnol. Prog.* 20(5):1301-8.
14. Steven R (2023) Effects of arginine in therapeutic protein formulations: a decade review and perspectives. *Antib. Ther.* 6(4):265–76.

15. Platts L, Falconer RJ (2015) Controlling protein stability: Mechanisms revealed using formulations of arginine, glycine and guanidinium HCl with three globular proteins. *Int. J. Pharm.* 486(1-2):131-5.
16. Strub C, Alies C, Lougarre A, et al. (2004) Mutation of exposed hydrophobic amino acids to arginine to increase protein stability. *BMC Biochem.* 5:9.
17. Baynes BM, Wang DI, Trout BL (2005) Role of arginine in the stabilization of proteins against aggregation. *Biochemistry* 44(12):4919-25.
18. Hada S, Burlakoti U, Kim KH, Han JS, Kim MJ, Kim NA, Jeong SH (2023) A comprehensive evaluation of arginine and its derivatives as protein formulation stabilizers. *Int. J. Pharm.* 647:123545.

/ **Received:** [6 enero 2026] | **Accepted:** 12 febrero 2026 | **Published:** 15 marzo 2026 |

Citation: Shenekji, J; AL-Daoud, A; Ghrewati, A. Using L-arginine hydrochloride as a preservative for polymerase enzymes in room temperaturas. *Bionatura.* 2026. Vol 11 No 1. <https://doi.org/10.70373/RB/2026.11.01.5>

Peer review information: Bionatura thanks the anonymous reviewers for their contribution to the peer review of this work using <https://reviewerlocator.webofscience.com/>

All articles published by Bionatura Journal are freely and permanently accessible online immediately after publication, without subscription charges or registration barriers.

Publisher's Note: Bionatura stays neutral concerning jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Research Article

Improvements in the solubilization of the tt-p0-ls chimeric protein, a subunit vaccine candidate against sea lice active ingredient of the salvac del norte vaccine candidate

Rutdali María Segura Silva ¹, Yunier Luis Paneque Díaz ², Mirlleys Peláez Sánchez ³, Nemecio González Fernández⁴, Alain Moreira Rubio⁵, Yamila Carpio González⁶, Amaury Pérez Sánchez ⁷

¹ Centro de Ingeniería Genética y Biotecnología de Camagüey, Camagüey, Cuba;

ruthdaly.segura@cigb.edu.cu. <https://orcid.org/0000-0003-2821-154X>

² Centro de Ingeniería Genética y Biotecnología de Camagüey, Camagüey, Cuba;

yunier.paneque@cigb.edu.cu. <https://orcid.org/0000-0001-6196-0425>

³ Centro de Ingeniería Genética y Biotecnología de Camagüey, Camagüey, Cuba;

mirlleys.pelaez@cigb.edu.cu. <https://orcid.org/0009-0003-6190-111X>

⁴ Centro de Ingeniería Genética y Biotecnología de Camagüey, Camagüey, Cuba;

nemecio.gonzalez@cigb.edu.cu. <https://orcid.org/0000-0002-6996-0013>

⁵ Centro de Ingeniería Genética y Biotecnología de Camagüey, Camagüey, Cuba;

alain.moreira@cigb.edu.cu. <https://orcid.org/0000-0003-3293-9410>

⁶ Centro de Ingeniería Genética y Biotecnología de La Habana, La Habana, Cuba;

yamila.carpio@cigb.edu.cu. <https://orcid.org/0000-0002-6238-3663>

⁷ Universidad de Camagüey, Camagüey, Cuba

<https://orcid.org/0000-0002-0819-6760>

* Correspondence: amaury.perez84@gmail.com

<https://doi.org/10.70373/RB/2026.11.01.6>

ABSTRACT

Sea louse is one of the marine pathogens that cause the greatest impact on the salmon industry. The chimeric protein TT-P0-Ls, the active ingredient of a vaccine candidate for the control of this entity, is expressed in *Escherichia coli*, in the form of inclusion bodies. During the protein extraction and refolding process, the stage with the greatest losses is solubilization, which affects its overall efficiency. The objective of the work was to establish the operating conditions in the solubilization stage to increase the yield of the TT-P0-Ls protein. Thus, after establishing the buffer for solubilization, experiments were designed and modeled using the Design Expert program, varying the concentration of dead cell debris, the solubilization time, and the pH of the buffer. Decreasing the concentration of the ruptured cream from 30 to 36 g/L, with a pH of 8 - 9, would achieve an increase in the concentration of the solubilized protein of interest of 2.47 times.

Keywords: sea lice; solubilization; TT-P0-Ls protein; purity; experimental design.

INTRODUCTION

Aquaculture is anticipated to be a key factor in the shift towards healthier and more sustainable diets, necessitating changes toward foods that have lower environmental impacts while meeting dietary requirements ¹.

Atlantic salmon (*Salmo salar*), hereafter just salmon, is a particularly interesting species to study for several reasons. It ranks as one of the top aquaculture species, exhibiting production growth that surpasses that of the overall aquaculture sector. This is to a large extent due to the fact that salmon producers are in the forefront in a number of productivity enhancing categories, such as advancements in production technology and development of the supply chain ².

Farmed Atlantic salmon constitutes 2% of the worldwide aquaculture sector, with factors influencing productivity growth, such as investments in research, recognized for transforming it into a high-value, global food commodity ¹.

From the early 1970s until 2012, the global production of farmed salmon grew at an annual rate of around 23%. The remarkable success of salmon farming is primarily due to advancements in technology, increasing demand, and immediate globalization ³.

Salmon is cultivated in a limited number of countries, yet it faces various economic shocks while being geographically dispersed and subjected to significant differences in biophysical conditions. In 2015, five nations accounted for 95.6% of the production. Norway led the way with a share of 55.3%, followed by Scotland (7.6%) and the Faroe Islands (3.3%) within Europe. The second largest producer, Chile, contributed 25.4% from South America, while Canada added 6% from North America. The remaining 4.4% was distributed among eight countries that face significant constraints on their production capacity due to the availability of suitable sites ².

Salmon farming faces production risks from biophysical factors such as fluctuations in seawater temperature, harmful algae, sea lice, and various salmon diseases, which in turn influence the volatility patterns of salmon prices ³.

The family *Caligidae* (*Crustacea*), which encompasses over 450 species spread across more than 30 genera, includes the salmon louse *Lepeophtheirus salmonis*, commonly referred to as “salmon lice.” This parasite is frequently found among salmonids and is a part of the marine ecosystem in the Northern Hemisphere ⁴.

The life cycle of *Lepeophtheirus* spp. is composed of eight stages: two planktonic nauplii, one infective copepod, two attached chalimus, two mobile pre-adult, and one adult male and female stage. The chalimus stage is particularly crucial for vaccine development, as lice are believed to first engage with their host during this phase through the formation of a frontal filament and subsequent blood feeding, followed by a transition into the adult stage ⁵.

Sea lice parasitize salmon during the marine stages of their life cycle, in both wild and farmed salmon, by attaching to their skin near the gills and fins ⁶ and feeding on skin, mucus, and blood, which leads to wounds, stress, and diminished health, potentially causing secondary infections with other pathogens ⁴.

In the salmon farming sector, the salmon louse has increasingly become a concern due to the abundance of hosts, which promotes ongoing re-infestation and the transfer of lice between farming sites ⁷.

Lice infestations in aquaculture have a considerable economic and ecological impact on a global scale ⁸. For instance, in 2018, the expenses related to combating the lice *L. salmonis* in the production of 1.2 million tons of salmon in Norway were estimated at € 520 million, with a minimum cost of € 0.5 per kilogram of fish ⁹. Other researchers ⁸ indicate that in Norwegian aquaculture, the loss of biomass growth due to lice per production cycle ranges from 3.62% to 16.55%, leading to an annual economic loss surpassing US\$ 436 million.

Addressing the costly and growing issue of lice requires a diverse array of initiatives and advancements specifically focused on lice control. Innovations can emerge through multiple approaches, which can be categorized as medicinal (such as treatments involving hydrogen peroxide and diflubenzuron), biological (like the use of cleaner fish that consume lice and breeding programs aimed at developing salmon resistant to lice), and mechanical (related to production techniques and equipment). Among these possibilities, mechanical and biological innovations are currently viewed as the most promising, but it is only the mechanical approach that has seen significant targeted government support through policy measures designed to encourage innovation ⁹.

Farmers utilize two primary strategies to address lice pressure: preventive and reactive treatments. Preventive measures focus on minimizing exposure between infective copepodids and fish, while reactive measures concentrate on eliminating lice that are attached or mobile on the host ⁸.

Up until 2015, chemical treatment was the preferred approach; however, the emergence of resistance to most chemicals has made this treatment ineffective ⁴. A significant issue is the resistance developing to the pesticides currently approved, leading to increased usage of these chemicals and

the consequent spread of resistance within louse populations, creating a detrimental cycle ⁷. In recent years, several non-medicinal treatments have emerged as alternatives, but these have resulted in new challenges, including higher post-treatment mortality rates and ethical dilemmas concerning the use of cleaner fish. Consequently, the lice issue has worsened, highlighting the need for innovative control strategies, preferably preventative measures like vaccination ⁴.

As stated by ¹⁰, vaccination is increasingly regarded as an effective and sustainable strategy for preventing a variety of bacterial and viral illnesses. Other authors ⁶ sustain that vaccination against salmon lice could serve as a significant alternative, as it is well-established that fish vaccines have substantially reduced the reliance on drugs, particularly antibiotics, for treating various fish diseases.

A paper ⁴ suggests that when searching for vaccine candidates targeting lice, two key criteria must be met for a successful result: (1) the antigens should be essential for the survival, development, or interaction of lice with their host, and (2) they must be presented in a mode that stimulates protective immune responses in the host.

Along with ¹¹, a functional vaccine for sea lice would be highly beneficial and would serve as a preventative measure rather than a treatment option. Nevertheless, creating vaccines for ectoparasites remains a significant technical challenge ¹².

In the case of ectoparasites, the significant physical separation between the pathogen and its host further complicates the effectiveness of vaccination. Since the ectoparasite primarily resides externally on the host, it is able to conceal a considerable portion of its constituents (i.e., potential antigens) from the host immune system, effectively putting these antigens “out of reach” of the host's defense mechanisms ¹³. If these concealed antigens could be made “visible” to the host immune system, it could potentially trigger a specific immune response that provides protection against them ¹².

Numerous studies have been conducted that test or analyze vaccine candidates aimed at controlling sea lice infestations in salmon. In one study ¹⁴, a novel gene (denoted as my32) from *Caligus rogercresseyi* was characterized, which has the highest identity with the *Lepeophtheirus salmonis* gene akirin-2. To assess the gene's function, an RNA interference experiment was carried out, resulting in a decrease in the number of ectoparasites on fish within the my32-dsRNA treated group. The recombinant my32 protein was utilized in a vaccination challenge trial to assess its effectiveness in providing protection against sea lice infestations. Notable reductions in the parasite count per fish were recorded at 24 days after the challenge.

In another study ¹⁵, the effectiveness of three sea lice vaccines was investigated against the initial stages of infestation, focusing on the transcriptome changes of immunized Atlantic salmon. In this research, three experimental groups of *S. salar* (Atlantic salmon) received vaccinations with recombinant proteins: Peritrophin (prototype A), Cathepsin (prototype B), and a combination of both (prototype C). The sea lice infestation was assessed during the chalimus I-II stages, which are the early infective phases, 7 days post-infestation. The results indicated that vaccine prototypes A, B, and C led to reductions in parasite burden of 24%, 44%, and 52%, respectively, compared to the control group.

In a recent study ⁴, the roles of two heme peroxidases from salmon louse (LsPx1-1 and LsPx1-2) were evaluated regarding their significance for the parasite's development and their potential as vaccine candidates. LsPx1-1 possesses two heme peroxidase domains and is expressed in ovaries and gut, whereas LsPx1-2 encodes one domain and contains N-terminal signal peptide and an Eph receptor ligand-binding domain. The results of this investigation indicate that LsPx1-1 is crucial for the development of the parasite; however, the vaccination formulations and methods tested did not markedly decrease lice infestations.

Similarly ⁶, a vaccine candidate composed of a peptide derived from ribosomal protein P0 was assessed for its effectiveness after *L. salmonis* infestation in a laboratory environment. The sampling results demonstrated the vaccine candidate's promising potential when administered intraperitoneally to the host, as it led to a reduction in ectoparasite numbers, lower counts of adult female lice, diminished fecundity, and with greater presumptive effect in F1 lice generation.

Likewise, ¹¹ compared the chimeric P0-my32 protein with the P0 peptide fused to the molecular adjuvant TT regarding immunogenicity and the ability to reduce lice infestation in Atlantic salmon after the experimental challenge. Both P0-my32 and TT-P0 proteins were expressed in *E. coli*, purified, and formulated with Montanide[®] ISA50 V2 as an adjuvant. A prime-boost vaccination strategy was implemented, and challenges were conducted at 2, 5, and 11 months following vaccination to examine the onset of immunity and the duration of protection. The findings indicate that vaccination may help diminish lice infestations in Atlantic salmon; however, further studies are necessary to validate effectiveness under field conditions.

The immunogenic properties and protective effects of a vaccine formulation based on a recombinant protein from the salmon lice gut (P33) against *L. salmonis* infestation in Atlantic salmon was investigated through a laboratory trial ¹². The results of this research indicated that the P33 vaccine can offer some degree of protection against both immature and adult salmon lice infestations, with

the degree of protection appearing to be dependent on the vaccine dosage, where higher doses led to lower rates of parasitic infestation.

Another study ⁵ demonstrated the possibility of developing a cost-effective synthetic peptide vaccine based on the secretions injected into the host by the parasite. The protein peroxiredoxin-2, obtained from the blood of Atlantic salmon affected by lice, was believed to contribute to antioxidative processes that aid the parasite's feeding. In this study, vaccinating Atlantic salmon with an experimental vaccine (peptide purity of 70%) provided superior protection against *C. rogercresseyi* (92%) compared to *L. salmonis* (60-70%).

Other examined approaches for controlling sea lice include the application of fine calcium oxide (CaO) particles on the planktonic stages of salmon lice under controlled lab conditions. The findings of this research showed that exposure to CaO (for 10 minutes at 0.2 g/L) decreased the number of nauplii progressing to the copepodid stage by 60-70% by reducing both survival and molting, while treatment with CaO (for 10 minutes at 0.6 g/L) resulted in up to 90% mortality of free-living copepodids ⁸.

In the study by ¹⁶, an identified non-host semiochemical, 2-aminoacetophenone (2-AA), isolated from turbot (*Scophthalmus maximus*) was used in the field to reduce sea lice prevalence and infective capability. Field experiments took place at a research fish farm located in north-west Scotland to assess the impact of 2-AA on the population of *L. salmonis* on Atlantic salmon (*S. salar*) hosts.

The creation of a vaccine candidate that targets conserved proteins shared between the pathogen and the host has a significant drawback: the high similarity can lead to the development of tolerance or the production of autoantibodies in the host. To address this issue, peptide-based vaccines have been formulated that demonstrate notable efficacy ¹⁷; for example, a vaccine developed targeting ticks that features a 20-amino acid peptide derived from the acidic ribosomal protein P0 of *Rhipicephalus* sp. ticks ^{18,19}.

With respect to the implementation and evaluation of downstream processes conducted in Cuban research facilities for antigen purification aimed at developing vaccine candidates against sea lice, two studies are reported.

In the first study ²⁰, a compact purification method was developed to isolate the MY32/Ls protein, analyzing various alternatives to define the steps for rupture, chromatography, and renaturation, in order to obtain the production of the active pharmaceutical ingredient (API). Due to techno-economic advantages, a chemical rupture process was established using 8 mol/L urea for 1 hour, which was 20 % cheaper than mechanical rupture with glass beads. For washing and elution of the protein in the

chromatographic step, pH and imidazole were evaluated. The specifications for the API produced in this study met the necessary standards for formulating the new vaccine against sea lice.

In the second study ²¹, the purification procedures for the MY32/Ls protein were designed and optimized to obtain the API against sea lice. This investigation utilized non-chromatographic purification methodologies based from existing literature to establish conditions for rupture, washing, solubilization, and refolding. The API yielded in this research demonstrated a superior immune response (IgG) compared to the positive control and exhibited higher purity.

In ¹⁷ the chimeric protein TT-P0-Ls (TT- The promiscuous T cell epitopes of tetanus toxin. P0- A 35 aminoacids peptide between aminoacids 267 and 301 of the sequence of P0 of *L. salmonis*. Ls- *L. salmonis*) was obtained, with high immunogenicity, by recombinant DNA methods, and expressed in the form of inclusion bodies in the *E. coli* strain (BL21, DE3). The objective of the present work is to increase the purity and recovery of the TT-P0-Ls protein in the solubilization stage.

MATERIALS AND METHODS

***E. coli* propagation stage**

A plate was streaked containing solid LB medium with the *E. coli* strain BL21 (DE3) transformed with the PET28aTT-P0-Ls plasmid ¹⁷. The streaked plate was incubated for 24 h at 37 °C in a thermostated shaker (RETOMED, Cuba). From the grown colonies, a sample was taken to inoculate a 2 L Erlenmeyer flask containing 500 mL of non-inducible culture medium. Also, 15 mL of 40% glucose and 500 µL of kanamycin was added to each Erlenmeyer at a final concentration of 50 µg/mL and then incubated in a thermostated shaker (RETOMED) for 16 h at 37 °C with constant stirring at 250 rpm.

Fermentation Stage

Fermentations were carried out in a fermentor (Marubishi) with 50 L of autoinduction medium with lactose, to which 3 L of the previously prepared inoculum was added. Fermentations last for 24 h. A temperature of 37 °C is maintained throughout the fermentative process while the pH is controlled in 7.0 by adding 25% ammonia or 20% orthophosphoric acid. During the fermentation process, the foam was controlled with Glanapon DG-158 antifoam prepared at 20%. Constant agitation was maintained in 500 rpm and aeration in 75 L/min.

Harvest Stage

The culture was centrifuged for 30 min at 3,000 rpm using batch centrifuges (CEPA) to eliminate the remains of culture medium and ensure that in the subsequent stages there are no traces of the antibiotic used during the preceding stages. The culture was kept at a temperature of - 20 °C in a refrigerated room.

Recovery Stage

The washed and concentrated cream was thawed and homogenized for 20 min using a dispersing agitator (Polytron) in a disruption buffer (300mM NaCl, 100mM sodium phosphate buffer, pH 6). The rupture was performed with the ball mill (DynoMill) carrying out a total of 5 passes. After the rupture operation, the washing solution (300 mM NaCl, 10 mM Tris, pH 6) and the ruptured biomass are added. The resulting mixture is homogenized for 10 min using a dispersing agitator (Polytron) at 10,000 rpm. After homogenization, the solid and liquid phases are separated in a batch centrifuge (CEPA), where the sample is centrifuged at 12,000 rpm for 1 h at 4 °C.

Experimental design for TT-POLs solubilization

A factorial design was developed using the Design Expert 8.0.6 program (Stat-Ease, Inc.). Three independent variables that influence protein solubility were taken into account: time (1, 6.5, 12 and 15 h); pH of the medium (pH of the solubilization solution) (6; 7; 8.5; 10 and 11) and concentration of the ruptured cells (1; 19.77; 30; 45; 60 and 70.23 g/L), resulting in 15 experimental runs (Table 1).

Table 1. Factorial design of the experiments obtained using the Design Expert software.

Run	Factor A: Solubilization time (h)	Factor B: pH of the solubilization solution	Factor C: Concentration of ruptured cells (g/L)
1	6.50	8.50	70.23
2	6.50	8.50	19.77
3	1.00	7.00	60.00
4	12.00	10.00	60.00
5	1.00	10.00	30.00
6	6.50	11.00	45.00
7	15.75	8.50	45.00
8	12.00	10.00	30.00

9	6.50	8.50	45.00
10	0.00	8.50	45.00
11	6.50	5.98	45.00
12	12.00	7.00	60.00
13	1.00	10.00	1.00
14	12.00	7.00	30.00
15	1.00	7.00	30.00

Variants of the solubilization solution (10 mM Tris, 10 mM Imidazole, 8 M Urea) were prepared at different pH values according to the experimental design described in Table 1, using hydrochloric acid 1M to decrease the pH, and Tris 1M to increase the pH, and employing a dispersing homogenizer (IKA T25). Then, the solution was mixed with the washed cream containing the different concentrations of broken cells (Table 1). The mixtures were homogenized with the help of a magnetic stirrer (Heidolph MR) and incubated at 37 °C in a thermostated shaker (RETOMED) operating at 150 rpm for 15 h. Samples were taken at different solubilization times according to the experimental design (Table 1). After the solubilization time had elapsed, the samples were centrifuged at 10,000 rpm for 30 min at 4 °C.

Determination of total protein concentration and percentage of purity of the TT-P0-Ls protein

Once the centrifugation was completed, 1 mL of the extraction supernatant was taken and the total protein concentration was determined by the bicinchoninic acid method ²². The clarified protein was also analyzed by the SDS-PAGE electrophoresis method ²³ in a 15% acrylamide/bisacrylamide gel, with the aim of observing the purity and the presence of the band at the height of 7 - 15 kDa. The remaining supernatant containing the solubilized protein was aliquoted and stored at 4 °C until use. From the values of the response variables considered in this study (Concentration of total proteins), an ANOVA analysis was carried out using the Design Expert program to know the independent variables that influence the most in the solubilization of the TT-P0-Ls protein.

RESULTS

Figure 1 shows the numerical values of the response variable considered in this study, that is, concentration of total proteins (in mg of total proteins/g of biomass) for each of the experimental runs included in the design of experiments.

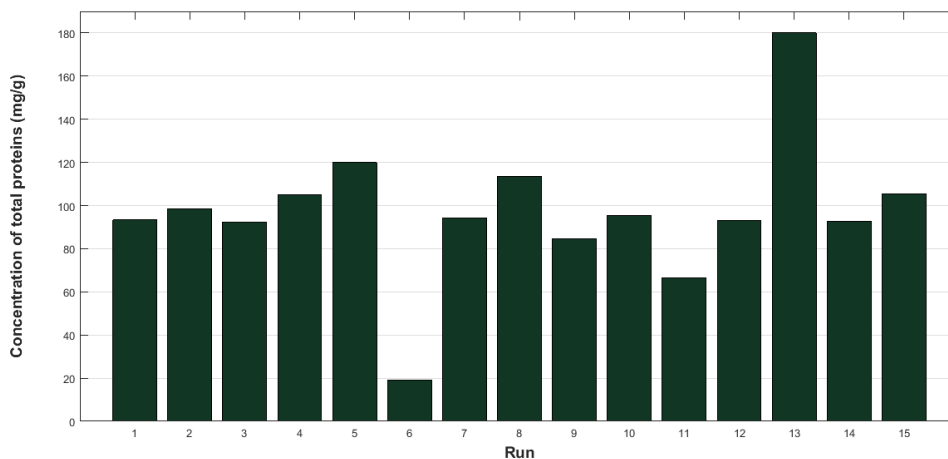


Figure 1. Results of total protein concentration according to the experimental design.

Table 2 presents the results of the ANOVA analysis performed by the Design Expert program.

Table 2. ANOVA analysis performed in the Design Expert program.

Source	Sum of squares	Degree of freedom	Mean of variables	F Value	P Value (Prob > F)
Model	12,497.94	9	1,388.66	2.72	0.14
A-Time	2.10	1	2.10	4.11E-003	0.95
B-pH	288.80	1	288.80	0.56	0.48
C-Conc.	459.57	1	459.57	0.90	0.38
AB	279.76	1	279.76	0.55	0.49
AC	355.99	1	355.99	0.70	0.44
BC	258.15	1	258.15	0.51	0.50
A2	429.27	1	429.27	0.84	0.40
B2	1,129.16	1	1,129.16	2.21	0.19
C2	598.09	1	598.09	1.17	0.32
Residue	2,555.82	5	511.16		
Cor Total	15,053.76	14			

Figure 2 graphically shows the result of the ANOVA analysis.

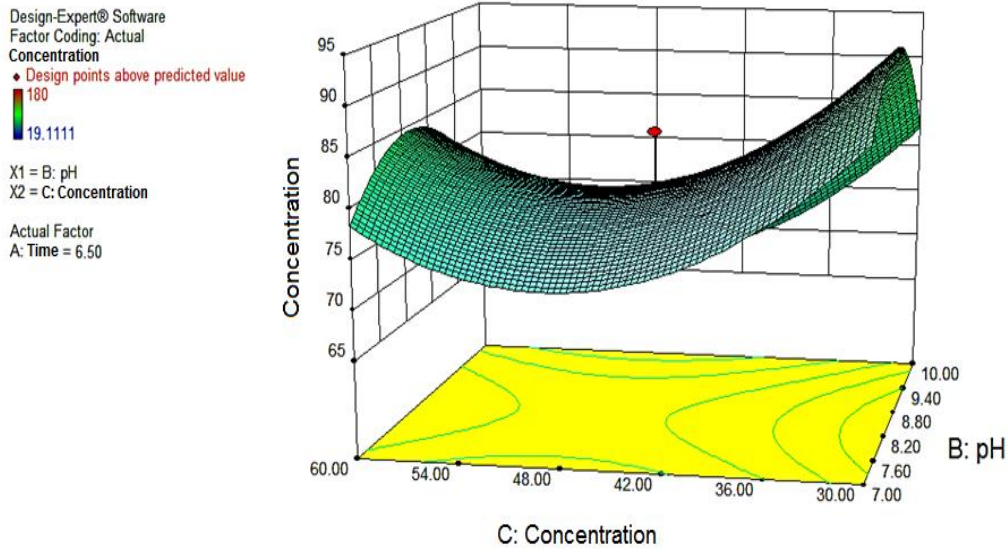
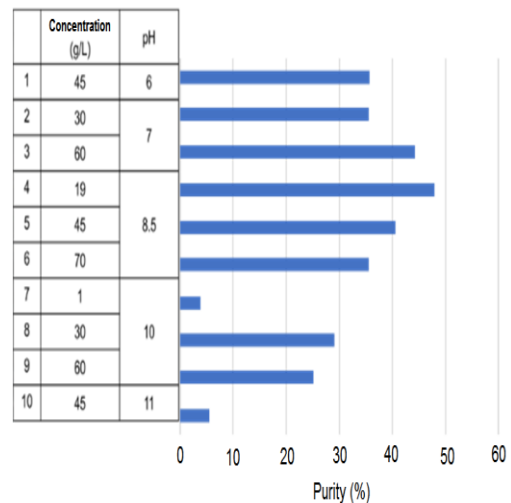
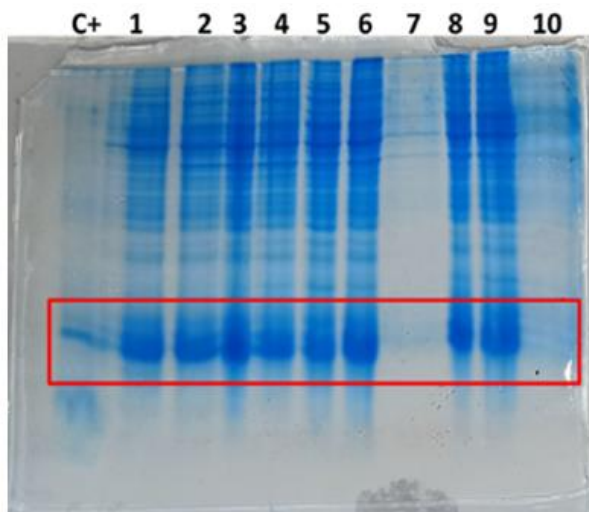


Figure 2. Result of ANOVA analysis in 3D coordinates. X axis: concentration of dead cells in solubilization. Y axis: pH of solubilization. Z axis: Protein concentration in the solubilization supernatant. The time to elaborate the graph was set at 6 h and 30 min (6.50 h).

Figure 3 presents in the image on the left the SDS-Page 15% of the proteins used according to the design of the experiment, containing in the first lane the positive control of the protein TT-P0-Ls (C+), and in the lanes of the 1 to 10 the different experimental runs. Likewise, the image on the right shows the results of the purity (%) of the solubilized protein for each of the experiments carried out.



(a)

(b)

Figure 3. Graphics related to:

a) SDS-PAGE 15% under reducing conditions.

b) Percent purity of the TT-P0-Ls protein in the solubilization supernatant at the different experimental points.

Table 3 exhibits the results of the concentration of total proteins in the solubilization stage in three different batches.

Table 3. Results of the concentration of total proteins in the solubilization stage in three different batches.

Batch code	Concentration (mg total proteins/g cell debris)
68N.2107	44.33
68N.2108	12.89
68N.2109	20.36

Figure 4 displays the SDS-PAGE 15% under reducing conditions of the samples generated in the rupture stage.

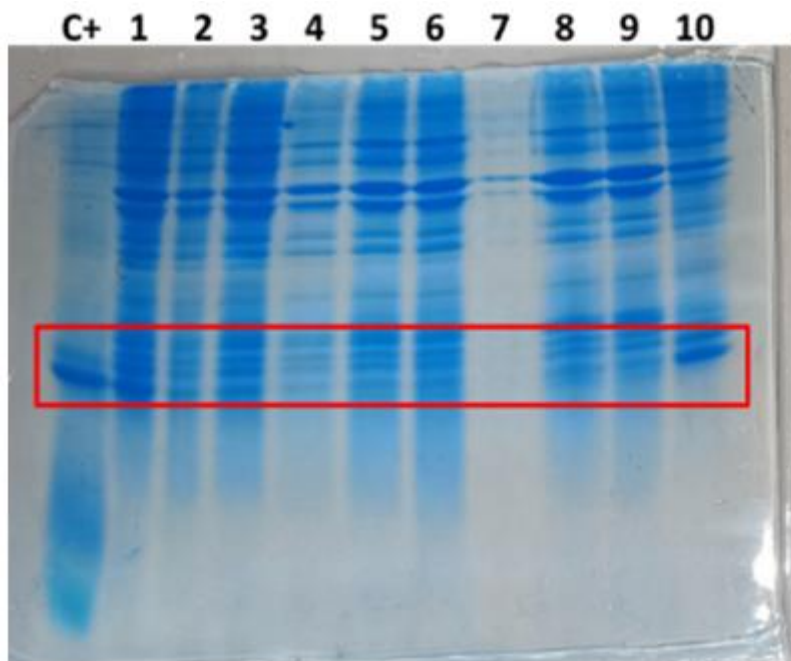


Figure 4. SDS-PAGE 15% under reducing conditions of the samples generated in the rupture stage. From left to right 1: Molecular weight standard (PPM), 2: TT-P0-Ls protein positive control (C+), 3: Sample from the last rupture pass (R1), 4: Wash supernatant (R2), 5: Remains of dead cells (R3), 6: TT-P0-Ls protein after solubilization process (R4).

Figure 5 shows the graphics related to SDS-PAGE 15% under reducing conditions and the percent purity of the TT-P0-Ls protein in the cellular debris.

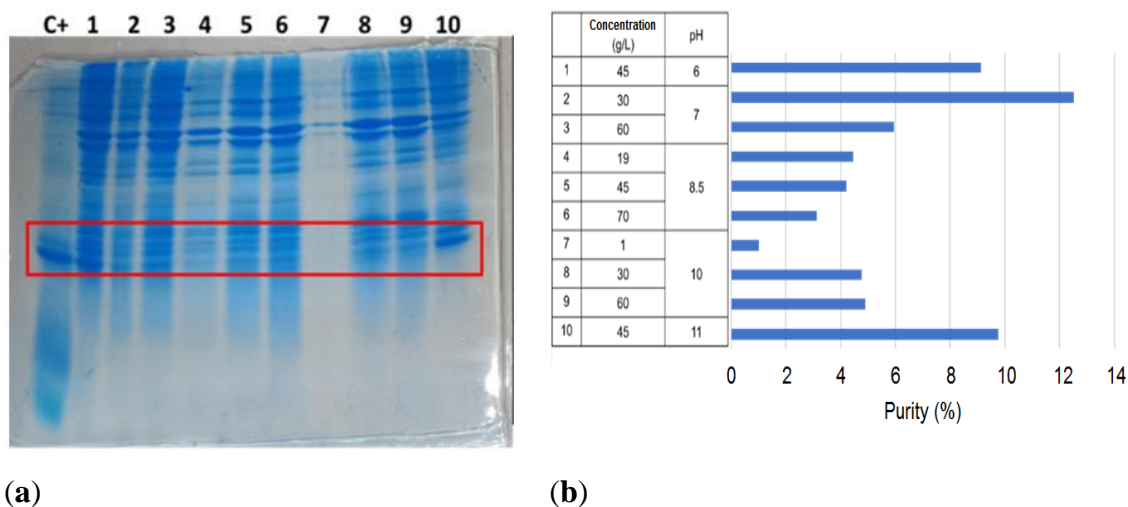


Figure 5. Graphics related to:

- a) SDS-PAGE 15% under reducing conditions.
- b) Percent purity of the TT-P0-Ls protein in the cellular debris.

DISCUSSION

The inclusion bodies produced in *E. coli* consist of a dense packing of denatured protein molecules in the form of particles. The renaturalization process, after they are extracted from the inclusion bodies, is arduous and usually has poor recovery and increases the production costs ²⁴.

The use of factorial design assisted by computer programs allows optimizing the number of experiments to be carried out, by proposing the best test variants considering the variables that most affect the processes ²⁵.

According to the results of Table 2 (ANOVA analysis), time is the parameter that least influences in the increment in the concentration of solubilized protein due to its high value ($p = 0.95$), therefore it is concluded that time does not affect the solubilization process of total proteins.

In this study, the concentration of ruptured cells is the variable that most influences the concentration of solubilized proteins, although there are no significant differences with the other variables ($p=0.38$)

It can be observed from Figure 2 that the pH and the concentration of dead cell residues are the parameters that most influence the concentration of solubilized proteins. This figure was elaborated for a time of 6 h and 30 min (6.50 h). Figure 2 also exposes that the optimal conditions of the pH

parameter are in the range of 8-9, while the best results of the parameter concentration of broken cells are in the range of 30-36 mg total proteins/g biomass. This is because the TT-POLs protein is more stable at pH 8 to 9 and does not precipitate when separating the dead cells from the protein suspension.

A study ²⁴ reports that pure recombinant human growth hormone (r-hGH) inclusion bodies were solubilized at different pHs in 100 mM Tris buffer (pH 3–13) and percent solubilization of r-hGH was monitored. The paper also indicated that the solubilization of r-hGH from inclusion bodies was observed by increasing the pH from 6 to 12.5. Higher solubilization of r-hGH from inclusion bodies was observed by incorporating 2M urea in 100 mM Tris buffer at pH 12.5. Further addition of urea in 100 mM Tris buffer at pH 12.5 did not further increase solubilization of r-hGH from the inclusion bodies. In 100 mM Tris buffer at pH 12.5 containing 2M urea, a maximum of 6 mg/ml of r-hGH were solubilized from the inclusion bodies. Use of 2M urea did not unfold the protein completely and preserved the native-like secondary structure. Finally, these authors stated that a combination of alkaline pH and 2M urea destabilized both the ionic and hydrophobic interactions which are the major cause of protein aggregation in inclusion bodies of human growth hormone.

Also, another study ²⁶ indicates that the preparation of good conditions for forming secondary structure of inclusion bodies during the solubilization step is momentous to decrease aggregation. Ionic and hydrophobic interactions are the 2 major factors to induce aggregation, while the presence of urea at the low concentration or the change of pH, particularly alkaline pH, in the solubilization step help to restore the secondary structures of inclusion bodies following with a better refolding of protein along with high levels of bioactivity. Therefore, using the mild process to solubilize the inclusion body and also select the protocol to dilute the concentration of proteins and remove impurity could be helpful to decrease the aggregation and enhance the yield of bioactive recombinant proteins.

Likewise, a research was carried out ²⁷ to investigate whether altering the pH might improve inclusion body resolution at lower urea concentrations as milder concentrations of denaturants ensure preservation of the proteins' secondary structure during the solubilization process. The results indicated that increasing the pH value of the 2 M urea buffer from 8.5 to 10.5 significantly improved the solubilization, indicating that solubility of TrxmGH inclusion bodies was pH-dependent with optimal solubilization observed at a pH value of 10.5. This study also specifies that developing an efficient method to extract biologically active proteins from inclusion bodies is often inevitable for certain proteins. For effective inclusion body solubilization and recovery, optimization of multiple parameters is required, such as the denaturant concentration, pH values, and the refolding method. However, 'mild' solubilization conditions, such as lower denaturant concentrations and alkaline pH, ensure better recovery of the proteins in its conserved native structure, but also help to avoid protein aggregations during the refolding process.

Singh et al.²⁸ denotes that non-classical inclusion bodies (inclusion body aggregates which are biologically active) have been reported to be very sensitive to pH at which they are purified, as use of high pH can lead to solubilization of protein molecules during purification. It also declared that mild solubilization processes using alkaline pH, high pressure, detergents, organic solvents and low concentration of chaotropes have been used for recovery of bioactive proteins from inclusion bodies. In most of the cases, improvements in inclusion body isolation and use of modern refolding methods in combination with mild solubilization improved the overall recovery of bioactive proteins. Likewise, the use of buffers with extreme pH has also been reported as a mild solubilization method. High pH (>12) buffer in combination with 2 M urea has been used successfully for solubilization of inclusion bodies. High pH buffer has been described to improve refolding yield by retaining native-like secondary structures in solubilized state.

Finally, a study²⁹ indicates that it has been widely reported that growth hormone inclusion bodies of different species expressed in *E. coli* can be solubilized by alkaline pH. These authors report that the solubilization of the recombinant human growth hormone r-hGH from inclusion bodies was observed by increasing the pH from 8 to 12.5. High alkaline pH (> 12.5), even though it helped in solubilizing r-hGH from inclusion bodies, resulted in extensive degradation of r-hGH. A maximum of 2 mg/ml of r-hGH was solubilized in 100 mM Tris buffer at pH 12.5 without the addition of urea or guanidine hydrochloride. These authors also declare that charge distribution provided by high alkaline pH, along the protein chain, was responsible for higher solubilization of r-hGH from inclusion bodies. This suggested that pH has a crucial role in destabilizing the inclusion body aggregation. Changing the charge distribution along the protein molecule by changing the pH generally affects the protein stability and may lead to an unfolding of the native protein. Finally, they indicate that the use of 2 M urea at alkaline pH improved r-hGH solubilization from inclusion bodies without disturbing the existing native-like secondary structure of the proteins.

The concentration of dead cells in the cell suspension is the parameter that has the most influence because the denaturing agents achieve total or partial rupture of the inclusion bodies. Solubilization must be able to break the protein packaging of the inclusion bodies and solubilize the proteins to their minimum structural state or a state that allows their subsequent purification. Most reports in the literature used high concentrations of the denaturing agent (between 6 and 8 mol/L) and protein concentrations in the solubilization step between 1 and 10 mg/mL³⁰⁻³⁶.

Singh et al.²⁸ state that the process of protein recovery from inclusion bodies involves four steps:

- 1) Purification of inclusion bodies to homogeneity (careful lysis of cells, purify inclusion bodies by detergent washing/ultracentrifugation),

- 2) Solubilization of inclusion bodies using mild solubilization agent (alkaline pH/hydrostatic pressure/organic solvent based buffers/2-3 M urea),
- 3) Refolding of the solubilized proteins (refolding at high protein concentration by pulsatile renaturation/on column refolding/urease mediated refolding) with optimal refolding buffer, and
- 4) Purification of the refolded protein. These steps can be optimized to recover high amount of bioactive protein from the inclusion bodies of *E. coli*.

It's worth mentioning that in the case of our research, detergents were not used in the solubilization step due to regulations issued by the International Cooperation on Harmonisation of Technical Requirements for the Registration of Veterinary Medicinal Products (VICH).

In Figure 3a the presence of the TT-P0-Ls protein can be observed in the supernatant obtained in the solubilization stage (indicated in the box with red borders), while in Figure 3b it is observed that the greatest protein purity is achieved at pH 8.5, with a decrease in purity occurring at a pH greater than 10.

In the three batches previously produced the concentration of total proteins in the solubilization stage did not have a stable behavior (Table 3), obtaining a low purity (14%) and the protein TT-P0-Ls was present in the cellular debris resulting from solubilization (Figure 4).

Figure 5 shows that there is a decrease in the TT-P0-Ls protein band in the cellular debris starting at a pH value of 8.5. Also, the purity of the TT-P0-Ls protein band in the cellular debris (and therefore the amount of this protein) increases at the extreme values of pH (6-7 and 11), while decreases at pH 8.5.

The subsequent execution of three experimental batches allowed more than 38 mg of total proteins per g of cellular debris to be obtained, with 31% purity at 25 ± 3 °C.

With the new process established in this work, the solubilization time would be reduced from 3 h to 1 h, obtaining an average concentration of total proteins of 95.55 mg/g of cellular debris and a purity of 40-50% at a pH of 8.5-9.

CONCLUSIONS

In the current study, up to 50% purity of the protein of interest in the supernatant and an increase in protein of interest of 2.47 times was achieved using a concentration of ruptured biomass in the range 30 - 36 g/L, at pH between 8 and 9, for 1 h at room temperature, while the amount of the protein of interest in the precipitate is reduced, after the solubilization was carried out. These results set a good

start point for the development of an efficient biotechnological process to obtain TT-P0-Ls antigen for further use as therapeutic vaccine against sea lice.

Author Contributions: Conceptualization, R.M.S.S., Y.L.P.D. and Y.C.G.; methodology, R.M.S.S., Y.L.P.D. and M.P.S.; software, Y.L.P.D. and M.P.S.; validation, N.G.F., A.M.R. and Y.C.G.; formal analysis, R.M.S.S. and A.P.S; investigation, R.M.S.S., Y.L.P.D., M.P.S., and Y.C.G.; resources, A.M.R. and A.P.S; data curation, Y.L.P.D., Y.C.G. and N.G.F.; writing—original draft preparation, Y.L.P.D., M.P.S. and A.P.S.; writing—review and editing, R.M.S.S., Y.C.G. and N.G.F.; visualization, A.M.R. and A.P.S.; supervision, R.M.S.S., Y.L.P.D. and Y.C.G.; project administration, R.M.S.S. and Y.C.G.; funding acquisition, R.M.S.S. and Y.L.P.D. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research received no external funding.

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

Informed Consent Statement: Not applicable.

Acknowledgments: The authors wish to thank to the scientists and technicians of the Animal Biotechnology Department of the Centre for Genetic Engineering and Biotechnology of Havana for their support and collaboration.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

REFERENCES

1. Robinson, J.P.W.; Fernandes, J. The hidden role of market-making in the rise of farmed salmon. *Environmental Research Letters*, **2025**, *20*, 084061. <https://doi.org/https://doi.org/10.1088/1748-9326/ade05>
2. Iversen, A.; Asche, F.; Hermansen, Ø.; Nystøyl, R. Production cost and competitiveness in major salmon farming countries 2003–2018. *Aquaculture*. **2020**, *522*, 735089. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.735089>
3. Zhang, D.; Fang, Y.; Liu, Y. Import demand under price and exchange-rate uncertainties: The case of U. S. Atlantic salmon imports. *Aquaculture*. **2023**, *574*,739712. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2023.739712>
4. Gislefoss, E.; Gamil, A.A.A.; Øvergard, A-C.; Evensen, Ø. Identification and characterization of two salmon louse heme peroxidases and their potential as vaccine antigens. *iScience*. **2023**, *26*, 107991. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.107991>

5. Johny, A.; Ilardi, P.; Olsen, R.E.; Egelanddal, B.; Slinde, E. A Proof-of-Concept Study to Develop a Peptide-Based Vaccine against Salmon Lice Infestation in Atlantic Salmon (*Salmo salar* L.). *Vaccines*. **2024**, *12*, 456. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/vaccines12050456>
6. Swain, J.K.; Carpio, Y.; Johansen, L-H.; Velazquez, J.; Hernandez, L.; Leal, Y. Impact of a candidate vaccine on the dynamics of salmon lice (*Lepeophtheirus salmonis*) infestation and immune response in Atlantic salmon (*Salmo salar* L.). *PLoS ONE*. **2020**, *15*, e0239827. <https://doi.org/https://doi.org/10.1371/journal.pone.023982>
7. Sandlund, L.; Nilsen, F.; Male, R.; Grotmol, S.; Kongshaug, H.; Dalvin, S. Molecular characterisation of the salmon louse, *Lepeophtheirus salmonis salmonis* (Krøyer, 1837), ecdysone receptor with emphasis on functional studies of female reproduction. *International Journal for Parasitology*. **2015**, *45*, 175-85. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpara.2014.10.003>
8. Ciani, E.; Stormoen, M.; Antonsen, S.I.; Nilsen, F.; Jørgensen, E.H.; Komisarczuk, A.Z.; Optimization of calcium oxide treatment against salmon louse (*Lepeophtheirus salmonis*). A controlled laboratory study. *Aquaculture Reports*. **2025**, *43*, 102894. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2025.102894>
9. Rosendal, G.K.; Olesen, I. Overcoming barriers to breeding for increased lice resistance in farmed Atlantic salmon: A case study from Norway. *Aquaculture*. **2022**, *548*, 737574. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2021.737574>
10. Mechlaoui, M.; Nordstrand, E.; Strandskog, G.; Jensen, I.; Seternes, T. Vaccinated Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) maintain a specific antibody response throughout the seasonal fluctuations of a full commercial production cycle in sea: a case study. *Aquaculture*. **2025**, *595*, 741536. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2024.741536>
11. Rodríguez, A.; Gadan, K.; Pérez, L.; Evensen, Ø.; Estrada, M.P.; Carpio, Y. Prime-boost vaccination with chimeric antigens adjuvanted in Montanide™ ISA50 V2 confers protection against experimental *Lepeophtheirus salmonis* infestation in Atlantic salmon (*Salmo salar* L.). *Frontiers in Immunology*. **2025**, *16*, 1570948. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2025.1570948>
12. Tartor, H.; Karlsen, M.; Skern-Mauritzen, R.; Monjane, A.L.; Press, C.M.; Wiik-Nielsen, C.; et al. Protective Immunization of Atlantic Salmon (*Salmo salar* L.) against Salmon Lice (*Lepeophtheirus salmonis*) Infestation. *Vaccines*. **2022**, *10*, 16. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/vaccines10010016>
13. Allen, J.R. Host resistance to ectoparasites. *Revue Scientifique et Technique*. **1994**, *13*, 1287-1303. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.20506/rst.13.4.824>

14. Carpio, Y.; Basabe, L.; Acosta, J.; Rodríguez, A.; Mendoza, A.; Lisperger, A.; et al. Novel gene isolated from *Caligus rogercresseyi*: A promising target for vaccine development against sea lice. *Vaccine*. **2011**, *29*, 2810-2820. <https://doi.org/10.1016/j.vaccine.2011.01.109>
15. Casuso, A.; Valenzuela-Muñoz, V.; Benavente, B.P.; Valenzuela-Miranda, D.; Gallardo-Escárate, C. Exploring Sea Lice Vaccines against Early Stages of Infestation in Atlantic Salmon (*Salmo salar*). *Vaccines*, **2022**, *10*, 1063. <https://doi.org/10.3390/vaccines10071063>
16. Hastie, C.; Wallace, C.; Birkett, M.A.; Douglas, A.; Jones, O.; Mordue, A.J.; et al. Prevalence and infection intensity of sea lice (*Lepeophtheirus salmonis*) on Atlantic salmon (*Salmo salar*) host is reduced by the non-host compound 2-aminoacetophenone. *Aquaculture*. **2013**, *410-411*, 179-183. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaculture.2013.06.035>
17. Leal, Y.; Velazquez, J.; Hernandez, L.; Swain, J.K.; Rodríguez, A.R.; Martínez, R.; et al. Promiscuous T cell epitopes boosts specific IgM immune response against a P0 peptide antigen from sea lice in different teleost species. *Fish and Shellfish Immunology*. **2019**, *92*, 322-330. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fsi.2019.06.018>
18. Rodríguez-Mallon, A.; Encinosa, P.E.; Méndez-Pérez, L.; Bello, Y.; Fernández, R.R.; Garay, H.; et al. High efficacy of a 20 amino acid peptide of the acidic ribosomal protein P0 against the cattle tick, *Rhipicephalus microplus*. *Ticks and Tick-borne Diseases*. **2015**, *6*, 530-537. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ttbdis.2015.04.007>
19. Rodríguez-Mallon, A.; Fernández, E.; Encinosa, P.E.; Bello, Y.; Méndez-Pérez, L.; Ruiz, L.C.; et al. A novel tick antigen shows high vaccine efficacy against the dog tick, *Rhipicephalus sanguineus*. *Vaccines*. **2012**, *30*, 1782-1789. <https://doi.org/10.1016/j.vaccine.2012.01.011>
20. Perez, C.E.; González, N.; León, L.; Salazar, E.; Pimentel, R.; Pimentel, E.; et al. Design of the purification process by metal-chelate affinity chromatography of a new vaccine antigen for the control of sea lice. *Biotechnología Aplicada*. **2015**, *32*, 1211-1216.
21. Perez, C.E.; González, N.; Salazar, E.; Pimentel, E.; Carpio, Y.; Limonta, M.; Design and Optimization of a Purification Process for MY32/Ls Protein Solubilizing Inclusion Bodies for a New Vaccine Against Sea Lice. *BioProcessing Journal*. **2015**, *14*, 3-13. <https://doi.org/10.12665/J141.Heredia>
22. Smith, P.K.; Krohn, R.I.; Hermanson, G.T.; Mallia, A.K.; Gartner, F.H.; Frovenzano, M.D.; et al. Measurement of Protein Using Bicinchoninic Acid. *Analytical Biochemistry*. **1985**, *150*, 76-85.
23. Hames, B.D.; Rickwood, D. *Gel Electrophoresis of Proteins: A Practical Approach*: IRL Press; 1981.

24. Singh, S.M.; Panda, A.K. Solubilization and Refolding of Bacterial Inclusion Body Proteins. *Journal of Bioscience and Bioengineering*. **2005**, *99*, 303-310. <https://doi.org/10.1263/jbb.99.303>
25. Collins, L.M.; Dziak, J.J.; Kugler, K.C.; Trail, J.B. Factorial Experiments - Efficient Tools for Evaluation of Intervention Components. *American Journal of Preventive Medicine*. **2014**, *47*, 498-504.
26. Mirhosseini, S.A.; Latifi, A.M.; Hosseini, H.M.; Seidmoradi, R.; Aghamollaei, H.; Farnoosh, G. The Efficient Solubilization and Refolding of Recombinant Organophosphorus Hydrolyses Inclusion Bodies Produced in *Escherichia coli*. *Journal of Applied Biotechnology Reports*. **2019**, *6*, 20-25. <https://doi.org/10.29252/JABR.06.01.04>
27. Kim, M.; Langley, R.J.; Perry, J.K.; Wang, Y. Recovery of mouse growth hormone from *E. coli* inclusion bodies using a mild solubilisation and repeated freeze–thaw approach. *Molecular Biology Reports*. **2025**, *52*, 627. <https://doi.org/10.1007/s11033-025-10685-y>
28. Singh, A.; Upadhyay, V.; Upadhyay, A.K.; Singh, S.M.; Panda, A.K. Protein recovery from inclusion bodies of *Escherichia coli* using mild solubilization process. *Microbial Cell Factories*. **2015**, *14*, 41. <https://doi.org/10.1186/s12934-015-0222-8>
29. Patra, A.K.; Mukhopadhyay, R.; Mukhija, R.; Krishnan, A.; Garg, L.C.; Panda, A.K. Optimization of Inclusion Body Solubilization and Renaturation of Recombinant Human Growth Hormone from *Escherichia coli*. *Protein Expression and Purification*. **2000**, *18*, 182-192. <https://doi.org/10.1006/prep.1999.1179>
30. Batas, B.; Chaudhuri, J.B.; Considerations of sample application and elution during size-exclusion chromatography-based protein refolding. *Journal of Chromatography A*. **1999**, *864*, 229-236. [https://doi.org/10.1016/S0021-9673\(99\)01030-4](https://doi.org/10.1016/S0021-9673(99)01030-4)
31. Clark, E.D.B.; Schwarz, E.; Rudolph, R. Inhibition of Aggregation Side Reactions during in Vitro Protein Folding. *Methods in Enzymology*. **1999**, *309*, 217-236. [https://doi.org/10.1016/S0076-6879\(99\)09017-5](https://doi.org/10.1016/S0076-6879(99)09017-5)
32. Fahey, E.M.; Chaudhuri, J.B.; Binding, P. Refolding and purification of a urokinase plasminogen activator fragment by chromatography. *Journal of Chromatography B*. **2000**, *737*, 225-35. [https://doi.org/10.1016/S0378-4347\(99\)00360-6](https://doi.org/10.1016/S0378-4347(99)00360-6)
33. Huxtable, S.; Zhou, H.; Wong, S.; Li, N. Renaturation of 1-Aminocyclopropane-1-carboxylate Synthase Expressed in *Escherichia coli* in the Form of Inclusion Bodies into a Dimeric and Catalytically Active Enzyme. *Protein Expression and Purification*. **1998**, *12*, 305-314. <https://doi.org/10.1006/prep.1997.0847>

34. Misawa, S.; Kumagai, I. Refolding of Therapeutic Proteins Produced in *Escherichia coli* as Inclusion Bodies. *Biopolymers (Peptide Science)*. **1999**, *51*, 297-307. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0282\(1999\)51:4<297::AID-BIP5>3.0.CO;2-I](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0282(1999)51:4<297::AID-BIP5>3.0.CO;2-I)
35. Müller, C.; Rinas, U. Renaturation of heterodimeric platelet-derived growth factor from inclusion bodies of recombinant *Escherichia coli* using size-exclusion chromatography. *Journal of Chromatography A*. **1999**, *855*, 203-13. [https://doi.org/10.1016/S0021-9673\(99\)00660-3](https://doi.org/10.1016/S0021-9673(99)00660-3)
36. Tran-Moseman, A.; Schauer, N.; Clark, E.D.B. Renaturation of *Escherichia coli*-Derived Recombinant Human Macrophage Colony-Stimulating Factor. *Protein Expression and Purification*. **1999**, *16*, 181-189. <https://doi.org/10.1006/prev.1999.1074>

Received: 12 diciembre 2025 / Accepted: 22 febrero 2026 / Published: 15 marzo 2026

Citation: Segura, R; Paneque, Y; Peláez, M; González, N; Moreira, A; Carpio, Y; Pérez A. Improvements in the solubilization of the tt-p0-ls chimeric protein, a subunit vaccine candidate against Sea Lice active ingredient of the Salvac del Norte vaccine candidate. *Bionatura*. 2026. Volumen 11, No 1. <https://doi.org/10.70373/RB/2026.11.01.6>

Publisher's Note: Bionatura stays neutral concerning jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open-access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Tareas Integradoras sustentadas en la inteligencia artificial para el desarrollo de competencias ambientales

Integrative tasks based on artificial intelligence for the development of environmental skills

Yaleane Martén Ojeda^{1*}, Dionisia de la Caridad Isalgué Álvarez², Luis Mariano Azcuy³

^{1, 2, 3} Carrera de Licenciatura en Educación Química. Facultad de Ciencias Aplicadas. Universidad de Camagüey Ignacio Agramonte Loynaz. Camagüey. Cuba.

1 ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-6926-7704>

2 ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0695-2072>

3 ORCID: <https://orcid.org/0000--00026956-9284>

*Correspondencia: yaleannemartensojeda@gmail.com, teléfono: 56870045

<https://doi.org/10.70373/RB/2026.11.01.7>

Resumen

Evaluar la efectividad de tareas integradoras sustentadas en inteligencia artificial (IA) para desarrollar competencias ambientales en la formación docente es el objetivo de esta investigación. Se partió de la hipótesis de que una intervención pedagógica mediada por IA, bajo un enfoque Ciencia-Tecnología-Sociedad (CTS), mejoraría significativamente el desempeño competencial medido de manera objetiva. El estudio adoptó un diseño cuasi-experimental de medición repetida (pre-test/post-test) con un grupo de 11 estudiantes justificado por su carácter exploratorio y el contexto educativo específico, lo que permitió un análisis cualitativo y detallado. Se implementaron cinco tareas integradoras donde los estudiantes utilizaron herramientas de IA para resolver problemas complejos que vinculan Química, Biología y sostenibilidad. Para obtener evidencia objetiva, se empleó un sistema de evaluación basado en seis criterios de desempeño observable (logrado/no logrado), organizados en tres dimensiones competenciales (cognitiva, procedimental actitudinal). Los resultados mostraron aumentos sustanciales en todos los indicadores (mejoras entre 46 y 64 puntos porcentuales). El dominio de herramientas de IA (indicador procedimental) pasó del 36% al 100% de logro. El indicador sintético de competencia integral (logro en al menos cinco de seis criterios) evidenció un avance del 36% al 91% de los estudiantes. Se concluye que el modelo es una estrategia pedagógica efectiva para el desarrollo holístico de competencias ambientales. Como implicación práctica, se valida un protocolo replicable que articula dimensiones competenciales, herramientas de IA y evaluación objetiva, reafirmando el rol mediador crítico del docente. Para futuras investigaciones, se destaca la necesidad de ampliar la escala del estudio y profundizar en el desarrollo de herramientas de IA explicables (XAI) específicas para la educación ambiental.

Palabras claves: educación ambiental, inteligencia artificial, tareas integradoras, competencias ambientales, evaluación del desempeño.

Abstract

Integrative tasks supported by artificial intelligence for the development of environmental competencies Evaluating the effectiveness of integrative tasks supported by artificial intelligence (AI) to develop environmental competencies in teacher training is the objective of this research. The hypothesis was that an AI-mediated pedagogical intervention, under a Science-Technology-Society (STS) approach, would significantly improve objectively measured competency performance. The study adopted a quasi-experimental design of repeated measurement (pre-test/post-test) with a group of 11 students justified by its exploratory nature and the specific educational context, which allowed a qualitative and detailed analysis. Five integrative tasks were implemented where students used AI tools to solve complex problems that link Chemistry, Biology and sustainability. To obtain objective evidence, an evaluation system was used based on six observable performance criteria (achieved/not achieved), organized into three competency dimensions (cognitive, attitudinal procedural). The results showed substantial increases in all indicators (improvements between 46 and 64 percentage points). Mastery of AI tools (procedural indicator) went from 36% to 100% achievement. The synthetic indicator of comprehensive competence (achievement in at least five of six criteria) showed progress from 36% to 91% of the students. It is concluded that the model is an effective pedagogical strategy for the holistic development of environmental competencies. As a practical implication, a replicable protocol that articulates competency dimensions, AI tools and objective evaluation is validated, reaffirming the critical mediating role of the teacher. For future research, the need to expand the scale of the study and delve into the development of explainable AI (XAI) tools specific for environmental education is highlighted.

Keywords: environmental education, artificial intelligence, integrative tasks, environmental competencies, performance evaluation.

Introducción

La preocupación por la degradación ambiental ha impulsado en las últimas décadas una renovación en los enfoques educativos, orientada hacia la formación de una conciencia ecológica desde todas las áreas del conocimiento. En América Latina, la educación ambiental se ha incorporado progresivamente en los currículos universitarios, buscando una articulación entre ciencia, tecnología y valores éticos¹. La UNESCO² señala que la educación puede ser una poderosa palanca para transformar nuestra relación con la naturaleza. En la misma línea, Llopiz et al.³ Plantean que la educación ambiental es concebida en la actualidad como una educación para el Desarrollo Sostenible

que permite la creación de condiciones materiales, culturales y espirituales, propiciando la elevación de la calidad de vida de la sociedad donde exista una relación armónica entre los procesos naturales y sociales, así como relaciones de equidad y justicia social. Mientras que Musitu et al.⁴ sostienen que la educación ambiental es “un gran recurso para el beneficio óptimo de las relaciones del ser humano con su medio, a través del conocimiento, sensibilización, promoción de estilos de vida saludables y comportamientos proambientales”.

En consecuencia, la enseñanza de la Química debe ir más allá de la transmisión de conceptos teóricos, promoviendo la comprensión de los procesos naturales y los impactos de las actividades humanas sobre el ambiente. Una vía prometedora para lograrlo es la utilización de tareas integradoras que, mediante el uso de recursos tecnológicos como la (IA), impulsen la búsqueda de soluciones para un desarrollo sostenible.

Sin embargo, aún son escasas las investigaciones que integren de forma explícita la inteligencia artificial en el diseño de tareas con enfoque ambiental lo cual revela la necesidad de desarrollar estrategias que combinen el potencial tecnológico de la IA con los objetivos de la educación ambiental, tomando la Química como eje articulador del conocimiento científico y la acción responsable.

En el contexto de la formación de futuros docentes de Biología, se observa que los estudiantes de primer año adquieren conocimientos básicos de Química y Biología, pero presentan una comprensión limitada y fragmentada de los conceptos ambientales y la interrelación entre ciencia y sociedad. A pesar de que la Química ofrece herramientas conceptuales para entender procesos ecológicos y cambios ambientales, su contenido suele abordarse de manera aislada y no aprovecha el potencial pedagógico de la IA para enriquecer el aprendizaje integrado. Lo anterior conduce al siguiente problema científico:

¿Cómo contribuir al desarrollo de competencias ambientales desde la Química en los estudiantes de primer año de la carrera Licenciatura en Educación Biología?

La importancia de la solución del problema radica en que la articulación de tareas integradoras, IA y educación ambiental se presenta como una vía efectiva para consolidar una formación científica con responsabilidad social, orientada al desarrollo sostenible y a la transformación del entorno.

El presente estudio tiene como objetivo general: Evaluar la efectividad de tareas integradoras desde la Química, apoyadas en herramientas de Inteligencia Artificial, como estrategia para fomentar el desarrollo de competencias ambientales en el ámbito universitario. Para ello, se plantean los siguientes objetivos específicos:

1-Fundamentar teóricamente la integración de la Inteligencia Artificial en la enseñanza de la Química con enfoque ambiental.

2-Diseñar e implementar tareas integradoras que utilicen herramientas de IA para el aprendizaje significativo.

3-Evaluar el impacto de la intervención en el desarrollo de competencias ambientales, mediante un sistema de criterios objetivos de desempeño.

4-Derivar implicaciones prácticas y orientaciones metodológicas para la implementación de la IA en procesos educativos vinculados con la sostenibilidad.

Al combinar Química con IA en un diseño pedagógico intencional, este estudio, pretende superar las limitaciones del enfoque tradicional como la fragmentación del contenido y la falta de motivación y ofrecer experiencias pedagógicas más dinámicas, personalizadas y contextualizadas. De esta forma, se busca fortalecer la formación integral del futuro docente y su capacidad para transmitir valores ambientales.

Materiales y métodos

Se implementó un diseño cuasi-experimental de medición repetida (pre-post) con un grupo, orientado a evaluar la efectividad de tareas integradoras sustentadas en inteligencia artificial para el desarrollo de competencias ambientales desde la Química.

Participantes:

La muestra estuvo conformada por 11 estudiantes de la carrera Licenciatura en Educación Biología de la Universidad “Ignacio Agramonte Loynaz”, seleccionados mediante muestreo intencional no probabilístico. El grupo incluyó a ocho estudiantes del curso regular diurno y tres estudiantes del curso por encuentro, todos correspondientes al mismo año académico. Aunque reducido el tamaño muestral, permite un análisis detallado y cualificado del fenómeno en estudio, lo cual es característico de investigaciones exploratorias en contextos educativos específicos.

Intervención: Tareas integradoras con IA:

La intervención consistió en la implementación de cinco tareas integradoras diseñadas bajo un enfoque Ciencia- Tecnología –Sociedad (CTS), donde los estudiantes utilizaron herramientas de inteligencia artificial (ChatGPT, GeoGebra IA, Canva AI, simuladores) para resolver problemas complejos que vinculaban Química, Biología, Sostenibilidad ambiental y Salud pública. Cada tarea tenía una duración aproximada de dos semanas y se implementaron de forma secuencial a lo largo del curso, abarcando desde la Unidad 2 hasta la Unidad 6 del programa de la asignatura de Química para biólogos, lo que permitió una integración longitudinal y progresiva de los contenidos.

Sistema de evaluación:

Consideraciones metodológicas iniciales.

Dada la naturaleza exploratoria del estudio y el tamaño muestral reducido de once estudiantes, si bien inicialmente se consideró el uso de escalas de percepción tipo Likert, se optó por un sistema de evaluación basado en criterios objetivos de desempeño observable para obtener evidencia más directa, objetiva y validable del desarrollo competencial real, superando las limitaciones de la autopercepción.

Para ello se establecieron tres dimensiones competenciales (cognitiva, procedimental, actitudinal) derivadas de los objetivos de aprendizaje de la intervención. Cada dimensión se operacionalizó en indicadores específicos para los cuales se definieron criterios de dominio medibles de manera binaria (logrado/no logrado). Este enfoque permitió determinar de manera precisa si cada estudiante alcanzaba los estándares establecidos en cada aspecto clave. Los instrumentos de medición, diseñados para recoger evidencia tangible del desempeño, incluyeron listas de cotejo, rúbricas analíticas y guías de observación. En la (**Tabla 1**) se detallan las dimensiones, sus indicadores, los criterios de dominio asociados y los instrumentos de medición correspondientes.

Tabla 1. Dimensiones, indicadores y criterios objetivos de evaluación.

Dimensión	Indicador	Criterio Objetivo de Dominio (Logrado/No Logrado)	Instrumento de Medición
Cognitiva	1.1-Comprensión de conceptos químicos aplicados al medio ambiente.	Obtiene $\geq 70\%$ de aciertos en prueba objetiva de 10 ítems sobre conceptos clave.	Prueba escrita de opción múltiple y desarrollo breve.
	1.2-Integración de saberes científicos y ambientales	Elabora un informe que evidencia la conexión Química-Sostenibilidad, alcanzando ≥ 3 puntos en una rúbrica analítica de 4 puntos.	Rúbrica de evaluación de informes.
Procedimental	2.1. Dominio de herramientas de IA para el aprendizaje	Utiliza correctamente ≥ 3 herramientas de IA diferentes (ChatGPT, GeoGebra IA, Canva) para buscar información y resolver problemas, según lista de cotejo	Lista de cotejo observacional + análisis de productos digitales.
	2.2. Procesamiento y comunicación de información	Genera un producto comunicativo original (infografía, gráfico, informe) que transforma información obtenida	Rúbrica de evaluación de productos comunicativos.

	ambiental mediante IA	con IA, alcanzando ≥ 4 puntos en rúbrica de 5 puntos	
Actitudinal	3.1. Actitud responsable hacia el medio ambiente	Participa activamente ($\geq 4/5$) en debates, discusiones y acciones propuestas relacionadas con la problemática ambiental.	Registro de observación sistemática del docente.
	3.2. Ética en el uso de la inteligencia artificial	Cita correctamente $\geq 80\%$ de las fuentes de información obtenidas mediante IA y respeta las normas de uso ético en todos sus productos.	Análisis documental de productos y citas.

Para establecer un juicio global sobre el desarrollo de la competencia ambiental integral, se definió que un estudiante la alcanzaría si lograba los criterios de dominio en, al menos, cinco de los seis indicadores evaluados. La aplicación de este sistema de evaluación se realizó de forma longitudinal, al finalizar cada una de las tareas integradoras, permitiendo trazar la evolución del desempeño individual y grupal a lo largo de la intervención.

Instrumentos, procedimiento de aplicación y procesamiento.

La evaluación se realizó bajo un diseño de medición repetida (pre-test/post-test). Los instrumentos detallados en la (Tabla 1) se aplicaron en dos momentos:

- Pre-evaluación: Antes del inicio de la intervención, para establecer una línea base del desempeño competencial.
- Post-evaluación: Tras la finalización de las cinco tareas integradoras, para medir el efecto de la intervención.

El procesamiento de datos se realizó en dos niveles:

- 1- Nivel individual por indicador: Para cada estudiante e indicador, se registró un valor binario (1=Logrado, 0=No logrado) según el cumplimiento del criterio objetivo de dominio.
- 2- Nivel agregado: Los resultados se expresaron como el porcentaje de estudiantes que lograron el criterio en cada uno de los seis indicadores, tanto en el pre-test como en el post-test. Adicionalmente, se calculó el porcentaje de estudiantes que alcanzó el criterio de competencia integral (logro en ≥ 5 indicadores) en cada momento de la medición.

Análisis de datos.

El análisis se abordó desde una perspectiva mixta, integrando técnicas cuantitativas y cualitativas:

Análisis cuantitativos: Se procesaron los datos binarios calculando los porcentajes de logro agregados por indicador y por dimensión competencial para las mediciones pre y post. La efectividad de la intervención se analizó comparando estos porcentajes mediante la diferencia en puntos porcentuales y la observación de la tendencia de mejora. El progreso hacia la competencia integral se evaluó de la misma forma.

Análisis cualitativo: Se basó en la triangulación de evidencias entre:

- a) Los resultados cuantitativos del sistema de criterios objetivos,
- b) Las observaciones registradas del docente – investigador durante las sesiones, y
- c) El análisis contenido de los productos finales generados por los estudiantes (informes, modelos, propuestas). Esta triangulación permitió interpretar la profundidad y el significado cualitativo de los cambios cuantitativos observados.

Resultados

El análisis de la literatura revisada evidencia una tendencia creciente hacia la integración de la inteligencia artificial (IA) como herramienta de apoyo en la enseñanza de las ciencias. Daudinot y Robert⁵ plantean que las tareas integradoras se han consolidado como estrategias pedagógicas efectivas para articular saberes de diversas disciplinas y promover aprendizajes significativos vinculados a la realidad social.

Desde una perspectiva didáctica, esta combinación, tareas integradoras potenciadas con IA, favorece el desarrollo de competencias científicas, la reflexión crítica y la formación de valores, al situar a los estudiantes en escenarios de investigación auténticos donde deben analizar, modelar y tomar decisiones informadas.

En cuanto al diseño pedagógico concreto, Rodríguez et al.⁶ determinaron regularidades teóricas fundamentales para el diseño de tareas integradoras. Para los fines de esta investigación, destacamos aquellas particularmente relevantes para integrar herramientas de IA: la selección de problemas auténticos vinculados a la realidad del estudiante; la articulación coherente de contenidos de diversas disciplinas; la promoción de procesos de investigación y pensamiento crítico; y la utilización estratégica de la tecnología como apoyo al aprendizaje. Estas regularidades proporcionan el sustento didáctico para incorporar la IA como una herramienta al servicio de un diseño integrador significativo.

En paralelo, la inteligencia artificial (IA) se ha introducido en la educación como una herramienta con potencial transformador para los procesos de enseñanza y aprendizaje. En este sentido autores como Moreno⁷ sostienen que, con una adecuada adaptación por parte del docente y del sistema, la IA

puede convertirse en una herramienta versátil que facilita la labor docente y personaliza los aprendizajes.

Sin embargo, integrar esta innovación tecnológica con el diseño de tareas integradoras plantea desafíos complejos. Como advierte Vera⁸ el avance tecnológico exige una evolución en las competencias que se desarrollan en la enseñanza de las ciencias. Para un uso exitoso, es necesario formar a los estudiantes en nuevas habilidades que les permitan aprovechar la IA para potenciar sus cualidades investigativas y personalizar sus experiencias, optimizando además el seguimiento de su proceso.

No obstante, la literatura no presenta un consenso absoluto sobre los beneficios de esta incorporación. Por un lado, existen advertencias críticas: Portillo et al.⁹ señalan que el uso excesivo o acrítico de tecnologías inteligentes puede generar dependencia y paradójicamente, disminuir el desarrollo del pensamiento crítico si no está mediado por una guía pedagógica sólida. De manera análoga, Sardiñas y Valdés¹⁰ reconocen el potencial motivador de la IA, pero enfatizan que su efectividad está condicionada por la formación docente y del acceso equitativo a recursos digitales, lo que representa un desafío mayor en contextos con brechas tecnológicas.

Por otro lado, se plantean cuestionamientos de fondo, especialmente en el ámbito de la educación ambiental. Algunos investigadores argumentan que la IA difícilmente puede sustituir el componente experiencial y emocional inherente a este campo, el cual se fundamenta en el contacto directo con la naturaleza y en la vivencia comunitaria. Desde esta visión, la IA debe entenderse estrictamente como una herramienta complementaria, útil para modelar, simular, o analizar datos, pero nunca como un reemplazo del trabajo reflexivo, práctico y situado en torno a los problemas ambientales locales.

En síntesis, la literatura consultada revela una diversidad de posturas. Por un lado, autores como Pérez et al.¹¹ destacan que las tareas integradoras constituyen un eje metodológico eficaz para fortalecer la conexión entre la teoría científica y la práctica social facilitando el trabajo interdisciplinario que permite a los estudiantes comprender la ciencia como un fenómeno vivo y contextualizado. Este enfoque es esencial para fomentar la conciencia ambiental, ya que se centra en el desarrollo de competencias críticas y valores éticos, pilares fundamentales de una educación para la sostenibilidad.

Por otro lado, en el ámbito tecnológico, autores como Delgado et al.¹² analizan las posibilidades de la IA para la enseñanza personalizada, argumentando que posibilitan la retroalimentación inmediata, la adaptación de contenidos y el seguimiento analítico del desempeño. Sin embargo, advierte que su efectividad depende de una integración pedagógica significativa, ya que un uso mecánico o superficial puede conducir a una deshumanización del proceso educativo.

Al cruzar ambos ámbitos, surge un consenso matizado. Si bien existe una tendencia clara hacia la integración de la IA como herramienta de apoyo en la enseñanza de las ciencias, especialmente en educación ambiental, esta incorporación no está exenta de tensiones teóricas en desafíos prácticos, como lo evidencian los estudios revisados.

Autores como Cruz et al.¹³ subrayan que la IA tiene un gran potencial para favorecer el aprendizaje interdisciplinario, y se concluye que puede potenciar el aprendizaje autónomo y la creatividad científica si, y solo si, se articula con tareas integradoras significativas y bien diseñadas.

No obstante, algunos autores adoptan una postura crítica y advierten que la excesiva dependencia tecnológica podría reducir la capacidad reflexiva de los estudiantes, desplazando la observación directa del entorno natural, que es esencial en la educación ambiental. Ellos sostienen que el contacto con la naturaleza y la acción comunitaria deben seguir siendo pilares del proceso formativo, complementados, pero no sustituidos por las herramientas digitales.

Así, el éxito de las tareas integradoras apoyadas en IA no parece depender de la tecnología en sí, sino de un diseño pedagógico triplemente fundamentado:

- 1) contextualizado (vinculado a problemáticas reales)
- 2) ético (que evite la dependencia y fomente el pensamiento crítico),
- 3) centrado en el desarrollo de una conciencia ambiental transformadora.

Esta triangulación entre didáctica, tecnología y propósito socio-ambiental representa el principal desafío y, a su vez, la brecha que la presente investigación busca explorar.

En consonancia con esta visión crítica, Ubal et al.¹⁴ enfatizan que la implementación de la IA en la enseñanza enfrenta brechas de acceso y capacitación docente. Según su investigación, el potencial pedagógico de estas tecnologías solo se materializa plenamente a menos que los educadores posean competencias digitales y una comprensión clara de su propósito educativo. Además, plantean que la IA debe emplearse con sentido crítico y ético, de modo que promueva la equidad y no profundice las desigualdades tecnológicas preexistentes.

En conjunto, las obras analizadas muestran una diversidad de enfoques hacia la adopción de la IA en el contexto de la educación ambiental. Mientras algunos autores resaltan sus aportes a la personalización y la interdisciplinariedad del aprendizaje, otros alertan sobre sus limitaciones y riesgos éticos.

De esta revisión se desprende la eficacia de las tareas integradoras apoyadas en IA depende, en última instancia, de tres factores clave:

1. Una mediación pedagógica consciente, que oriente el uso de la tecnología hacia fines formativos y críticos.

2. Una capacitación docente sólida, que garantice la interpretación y aplicación adecuada de los recursos digitales.
3. Una contextualización ambiental auténtica, que asegure que los contenidos y tareas respondan a desafíos ecológicos locales y globales con relevancia para el estudiante.

Por lo tanto, la bibliografía revisada sugiere que el equilibrio dialéctico entre tecnología, pedagogía y ética ambiental será determinante para que la IA trascienda su función instrumental y contribuya de manera genuina a la transformación de la educación hacia la sostenibilidad.

La presente propuesta pedagógica surge de la necesidad de crear puentes explícitos entre la Química para Biólogos y la Biología, asignatura del primer año de la Licenciatura en Educación Biología. Su diseño se alinea con los objetivos generales de ambas disciplinas, buscando operacionalizarlos a través de una evaluación formativa y significativa.

Por un lado, el programa de Química persigue integrar conocimientos sobre las propiedades y aplicaciones de sustancias inorgánicas y orgánicas mediante la aplicación de leyes y teorías fundamentales, revelando la relación causal entre estructura, propiedades y aplicaciones. Simultáneamente, fomenta el desarrollo de habilidades para la construcción e interpretación de modelos gráficos y datos, así como cualidades profesionales como la sensibilidad, el amor por la naturaleza y la convicción de mejorar la práctica pedagógica.

Por otro lado, el programa de Biología plantea valorar la belleza de la naturaleza biótica y adoptar una postura bioética para la conservación del medio ambiente y un desarrollo sostenible, en apego a la legislación vigente.

Para lograr una sinergia entre los objetivos de ambas disciplinas, se identificaron y vincularon contenidos clave de ambos programas de estudio. Desde la Química, se tomaron los temas relacionados con la Nomenclatura de sustancias inorgánicas, Sistemas dispersos, El comportamiento termodinámico y cinético de las reacciones químicas, Equilibrio químico y Nociones de Química Orgánica. Desde la Biología, se integró el estudio de los virus y la biología celular. Para materializar esta articulación, se diseñó e implementó una intervención basada en tareas integradoras.

Estas son actividades de evaluación complejas que sitúan al estudiante ante un contexto o problema específico, donde debe aplicar y sintetizar los conocimientos y habilidades de ambas asignaturas para proponer soluciones o análisis fundamentados.

Cada tarea integradora seguirá una estructura estandarizada para garantizar claridad en los objetivos y el proceso de trabajo:

1. Tema y Título: Delimita el ámbito conceptual específico.
2. Objetivo: Define el propósito de aprendizaje y la competencia a demostrar.

3. Contexto del Problema: Presenta una situación realista o un escenario que sirve como punto de partida motivador.

4. Actividades a Desarrollar: Describe las acciones concretas que el estudiante debe realizar (investigar, analizar, crear, calcular, proponer).

5. Bibliografía: Lista fuentes recomendadas y obligatorias.

6. Herramientas con Inteligencia Artificial a Utilizar: Indica, de manera guiada y crítica, recursos digitales que pueden emplearse como apoyo en la investigación o el desarrollo de la tarea.

Se implementaron cinco tareas integradoras bajo este modelo. A modo de ejemplo, dos de ellas abordaron los siguientes problemas socio-científicos con un claro nexo ambiental.

- 1- Evaluar el rol, los impactos y la ética del uso del cloruro de sodio (NaCl) como componente de una vacuna frente al COVID-19.
- 2- Analizar la función del Omega -3 en la recuperación del Cikungunya y su relación con la contaminación ambiental que propicia los brotes epidémicos.

(El protocolo detallado de estas tareas; incluyendo sus objetivos, actividades completas y recursos, se presenta en el **Apéndice A**. Las otras tres tareas, siguieron la misma estructura, abordaron problemas análogos vinculando virología, Química y sostenibilidad.

Una vez implementadas las tareas integradoras, se procedió a evaluar su efectividad mediante el sistema de criterios objetivos descrito en la metodología (Tabla1). Los resultados del análisis pre y post intervención, se presentan en la (Tabla 2).

Tabla 2. Logro de dominio pre y post tras intervención con IA, por indicador (n=11)

Dimensión	Indicador	Pre(n)	Pre (%)	Post (n)	Post (%)	Diferencia (p.p.)
Cognitiva	1.1-Comprensión de conceptos químicos aplicados al medio ambiente.	4	36	9	82	+46
	1.2-Integración de saberes científicos y ambientales.	5	45	10	91	+46
Procedimental	2.1-Dominio de herramientas de IA para el aprendizaje.	3	36	11	100	+64
	2.2-Procesamiento y comunicación de información ambiental mediante IA.	3	27	10	91	+64

Actitudinal	3.1-Actitud responsable hacia el medio ambiente.	4	36	9	82	+46
	3.2-Ética en el uso de la inteligencia artificial.	4	36	10	91	+55
Competencia integral	Logro en ≥ 5 de 6 indicadores	4	36	10	91	+55

Como síntesis de los datos, la intervención generó aumentos sustanciales en el logro de los seis indicadores, con mejoras que oscilaron entre los 46 y los 64 puntos porcentuales. Los avances más notorios se concentraron en la dimensión procedimental: el dominio operativo de herramientas de IA (Indicador 2.1) se consolidó en la totalidad del grupo (11 estudiantes, 100%), y la capacidad para procesar y comunicar información ambiental con estas herramientas (Indicador 2.2) mostró la mejora más notable en puntos porcentuales (+64 p.p.), pasando de tres a 10 estudiantes.

En el nivel de síntesis global, el indicador de competencia integral (logro en al menos cinco de los seis indicadores) refleja el impacto holístico de la intervención: el número de estudiantes que alcanzó este estándar pasó de cuatro a 10, lo que representa un incremento de 55 puntos porcentuales (de 36% a 91%).

Discusión

El propósito de este estudio fue evaluar la efectividad de un modelo pedagógico basado en tareas integradoras con IA para el desarrollo de competencias ambientales. Los resultados en la Tabla 2 confirman la viabilidad del modelo, mostrando mejoras significativas en todas las dimensiones evaluadas. Como complemento cuantitativo final, la Tabla 3 sintetiza el logro de dominio por dimensión tras la intervención, ofreciendo una visión clara del estado competencial alcanzado por los 11 estudiantes. A continuación, se discuten estos hallazgos a la luz de la literatura, comenzando por la dimensión donde el cambio fue más transformador.

Tabla 3: Impacto pedagógico y proyecciones por dimensión (n=11)

Dimensión	Impacto Pedagógico (Hallazgo principal)	Fortaleza (Logro cuantitativo)	Área de oportunidad	Recomendación
Cognitiva	La IA facilitó la comprensión	.Comprensión conceptual: 10/11	La transferencia e integración	Diseñar tareas que expliciten

	profunda de conceptos clave, sentando una base sólida para la integración.	(máximo logro) .Integración de saberes: 9/11 (logro alto)	interdisciplinar puede profundizarse.	puentes entre conceptos y su aplicación sistémica.
Procedimental	La mediación pedagógica garantizó un dominio técnico universal, transformando la IA en herramienta de creación.	.Dominio técnico de IA: 11/11 (logro total) .Procesamiento y comunicación: 10/11 (logro muy alto)	La aplicación crítica y comunicativa tiene un margen de perfeccionamiento.	Fomentar la revisión por pares y socialización de productos creados con IA.
Actitudinal	La tecnología actuó como catalizador efectivo para la formación ética en el uso de recursos digitales.	.Ética en el uso de IA: 10/11(logro muy alto) .Actitud responsable: 9/11 (logro alto)	La internalización de la responsabilidad para la acción proactiva.	Vincular los aprendizajes a proyectos de impacto ambiental tangible en la comunidad.
Integral	Se valida un modelo pedagógico holísticamente efectivo, donde la orquestación didáctica es clave.	10/11 estudiantes lograron competencia integral (Dominio en ≥ 5 de 6 dimensiones).	Un caso particular requiere análisis diferenciado.	Realizar un estudio de caso cualitativo para personalizar estrategias de apoyo.

Los hallazgos revelan que la intervención generó avances sustanciales en las competencias cognitivas asociadas a la educación ambiental. De los seis indicadores evaluados, cinco registraron incrementos superiores a 50 puntos porcentuales, oscilando entre 46 y 64 PP. Este progreso se reflejó a nivel individual donde, como se observa en la Tabla 3, 10 de los 11 participantes alcanzaron logro integral en la mayoría de los indicadores, corroborando la eficacia del modelo pedagógico durante las ocho semanas de implementación.

El hallazgo más notable reside en la dimensión procedimental, donde la totalidad del grupo (11 estudiantes, 100%) alcanzó el dominio operativo de las herramientas de IA (Indicador 2.1), y que 10 de 11 (91%) demostraron capacidad para procesar y comunicar información ambiental con ellas

(Indicador 2.2). Esta mejora de +64 PP trasciende la mera alfabetización digital. Este resultado indica que, bajo una mediación pedagógica intencionada como la establecida en los criterios de las tareas, la inteligencia artificial no genera dependencia pasiva, sino que actúa como un andamiaje procedimental que potencia la capacidad de resolución de problemas. Esto valida y extiende las propuestas de Rodríguez et...al⁶ sobre la apropiación de lo esencial, demostrando que los estudiantes pueden evolucionar de usuarios acrílicos a creadores de contenido informado, utilizando la IA para sustentar propuestas propias y complejas.

Los avances en la dimensión cognitiva son igualmente sustanciales. El incremento de 46 puntos porcentuales tanto en la comprensión conceptual (Indicador 1.1) como en la integración de saberes (Indicador 1.2), alcanzando logros superiores al 80%, sugiere que la IA facilitó más que la retención de información. Según la Tabla 3, nueve de 11 estudiantes dominaron la comprensión conceptual, mientras que 10 de 11 lograron integrar saberes interdisciplinarios. Las tareas de modelado y análisis con IA funcionaron como "microscopios cognitivos", permitiendo visualizar y conectar fenómenos abstractos que vinculan Química, Biología y Sostenibilidad. Esto corrobora el potencial del enfoque CTS para desarrollar pensamiento sistémico, tal como postulan Pérez et al.¹¹ y Cruz et al.¹³, y va más allá de la personalización del aprendizaje al demostrar que la IA puede estructurar andamiajes para la construcción del conocimiento interdisciplinar.

Los resultados actitudinales son cruciales para una educación ambiental con sentido. Las mejoras de 46% y 55% en los indicadores de actitud responsable (3.1) y ética en el uso de la IA (3.2) revelan que la tecnología, lejos de ser neutral, puede ser un catalizador para la reflexión valórica. La experiencia de analizar y proyectar impactos ambientales mediante herramientas de IA generó una conexión emocional y ética con los problemas, complementando, no sustituyendo, el llamado al contacto directo con la naturaleza Sardiñas y Valdés¹⁰. Además, como muestra la Tabla 3, nueve de 11 estudiantes desarrollaron actitud responsable y 10 de 11 demostraron ética en el uso de IA. El manejo ético documentado (citación, verificación) muestra que es factible y necesario integrar la formación en ciudadanía digital dentro de la educación ambiental, preparando a los futuros docentes para un uso crítico y responsable de la tecnología.

La evidencia más robusta de la efectividad del modelo es el salto en la competencia integral: 10 de los 11 estudiantes (91%) lograron el dominio en al menos cinco de las seis dimensiones tras la intervención, como se ilustra en la siguiente distribución:

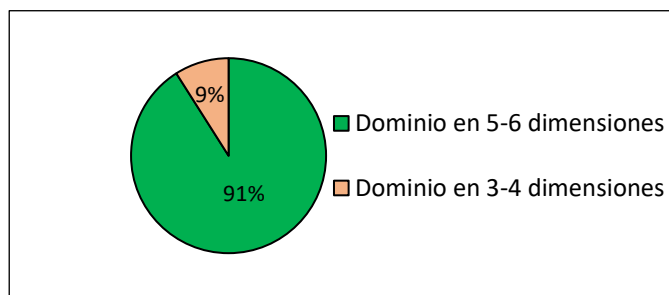


Figura 1: Competencia Integral Post- Intervención (n=11)

Este logro de competencia integral (Figura 1) proporciona una evidencia empírica crucial para el debate teórico identificado en la literatura revisada. Los resultados demuestran que, cuando la IA se orquesta pedagógicamente dentro de un diseño triplemente fundamentado contextualizado, ético y centrado en una conciencia ambiental transformadora, logra trascender su función instrumental. Así, se responde a las advertencias de autores como Sardiñas y Valdés¹⁰ y otras posturas críticas: lejos de generar dependencia pasiva o sustituir la experiencia directa con la naturaleza, la tecnología, bajo esta mediación, actúa como un catalizador que potencia y complementa la reflexión ética, el pensamiento sistémico y la capacidad de acción informada, validando la necesidad del equilibrio dialéctico entre tecnología, pedagogía y ética ambiental.

Conclusiones

Este estudio evaluó la efectividad de un modelo pedagógico basado en tareas integradoras sustentadas en inteligencia artificial (IA) para el desarrollo de competencias ambientales en futuros docentes de Biología. Los resultados permiten concluir que este modelo constituye una estrategia pedagógica efectiva para promover competencias holísticas (cognitivas, procedimentales y actitudinales). Dicha conclusión se respalda en los datos objetivos que muestran mejoras sustanciales en los seis indicadores evaluados y un aumento del 36% al 91% (Tabla 2).

Las principales implicaciones prácticas derivadas son:

- 1- La validación de un modelo replicable que articula de manera explícita dimensiones competenciales, herramientas de IA específicas (generativas y de modelado) y evaluación por criterios objetivos.
- 2- La reafirmación del rol mediador, crítico e insustituible del docente, cuya guía es fundamental para transformar el potencial tecnológico en aprendizaje significativo y ético.

No obstante, es necesario señalar las limitaciones de este estudio exploratorio, principalmente su tamaño muestral reducido (n=11) y el contexto específico de aplicación, lo cual restringe la generalización estadística de los resultados. Además, el éxito observado estuvo condicionado por un acceso uniforme a la tecnología y una guía docente intensiva.

Por ello, para futuras investigaciones se recomienda:

- 1- Ampliar la escala del estudio con muestras más diversas y, de ser posible, grupos de control.
- 2-Profundizar en el desarrollo y evaluación de herramientas de IA de carácter explicable y específico para la educación científica-ambiental.

Se hipotetiza que dotar a los futuros profesores de este instrumental crítico y comprensible potenciará su capacidad para formar ciudadanos capaces de interpretar y actuar con rigor ante los desafíos socio-ambientales contemporáneos.

Referencias

1. Pataca Rodríguez F, Flores E. Desarrollo sostenible desde la educación ambiental en Latinoamérica: Una revisión sistemática. *Cienc Lat Rev Cient Multidiscipl.* 2022; 6(3):1981-2000.
2. Azoulay A. Directora General de la UNESCO. Unesco. 2019. Disponible en: <https://www.unesco.org/es/articles>
3. Llopiz-Guerra K, Ruiz DU, Hernandez RM, Mejia VLV, Nunayalle JDRJ, Sanchez KR. Importance of Environmental. Education in the Context of Natural Sustainability. *Nat Eng Sci.* 2024; 9(1):57-71.
4. Musito Ferrer D, Esteban Ibáñez M, León Moreno C, Callejas Gerónimo E. Fiabilidad y validez de la escala de actitudes hacia el medio ambiente natural para adolescentes (Aman-a). *Rev Humanid.* 2020;(39):247-70.
5. Daudinot AR, Robert RE. Integración desde la tarea docente. *EFDeportes.com.* 2014; 19(199). Disponible en: <http://www.efdeportes.com/efd199/integracion-desde-latarea->
6. Rodríguez Molina K, Meneses Martin Z, Velazco Martin Y. La tarea integradora una necesidad para potenciar el aprendizaje desarrollador. *Revista Edusol volumen 22 número 79.* 2022. doi <http://SciELO.sld>
7. Moreno Padilla RD. La llegada de la inteligencia artificial a la educación. *Rev Investig Tecnol Inf.* 2019; 7 (14):260-70.
8. Vera F. Integración de la Inteligencia Artificial en la Educación superior: Desafíos y oportunidades. *Transformar.* 2023; 4(1):17–34.
9. Portillo Legarda WO, Olaya Gómez GA, Rojas Barajas YY, Trochez Medina O, Diaz Garcia JD. La inteligencia artificial generativa y el rol del docente en la enseñanza. *Cienc Lat Rev Cient Multidiscipl.* 2025; 9(6):1623-35.
10. Sardiñas Padilla E, Valdés García K. Incorporación de la inteligencia artificial a la educación cubana. Ventajas y limitaciones. *Región Científica.* 2025; 4(1):5-0.

11. Pérez Agramonte M, García González MC, Quintana Verdecia E. Tareas docentes integradoras desde el proceso de enseñanza aprendizaje de la disciplina Diagnóstico Integral de Laboratorio. *Humanid Méd.* 2024; 24(1):e2506.
12. Delgado MA, Sebastián, Delgado Navarrete NB, Chenche Jácome WL, Andrade Zamora F. Inteligencia Artificial en la Educación. Transformando los Entornos Digitales para un Aprendizaje Personalizado. *Rev Univ Soc.* 2025; 17(2).
13. Cruz Carballosa Y, Neyra Mosqueda R, Noa García M, Cruz Suárez B, Gainza López X. Inteligencia artificial: una herramienta clave en la enseñanza de la investigación científica en Mayarí. *Rev Cub Informática Méd.* 2025.
14. Ubal M, Tambasco P, Martínez S, García M. El impacto de la Inteligencia Artificial en la educación. Riesgos y potencialidades de la IA en el aula. *RiiTE Rev Interuniv Investig Tecnol Educ.* 2023; 15:41-57.

APÉNDICE

Contexto de implementación y procedimiento general.

Modalidad: Las tareas se implementaron en el marco de clases prácticas de la asignatura Química para biólogos en la carrera de Licenciatura en Educación Biología de la Universidad de Camagüey.

· Duración y alcance curricular: La intervención tuvo un carácter longitudinal, estructurándose a lo largo de cinco unidades consecutivas del programa de Química para biólogos (Unidades 2 a la 6).

Cada tarea integradora se diseñó para corresponderse con los contenidos específicos de una de estas unidades, asegurando una aplicación progresiva y contextualizada de los conocimientos.

· Rol del docente: El docente-investigador actuó como facilitador y mediador crítico. La dinámica para cada tarea consistió en:

- 1- Una fase de investigación individual (primera semana), donde los estudiantes analizaron el problema y consultaron recursos con apoyo de IA.

- 2- Una fase de trabajo colaborativo y retroalimentación (segunda semana), centrada en una sesión presencial para discutir hallazgos, resolver dudas y perfeccionar los productos finales con guía experta.

· Sistema de evaluación: El logro se evaluó mediante el sistema de criterios objetivos detallado en el artículo (Tabla 1: Dimensiones e Indicadores). Se aplicó una rúbrica analítica a cada producto entregable, asignando una valoración binaria (1: Logrado / 0: No Logrado) para cada indicador. Para el análisis global, los resultados binarios de todos los estudiantes se agregaron para calcular el

porcentaje del grupo que logró cada indicador en los momentos pre y post intervención, permitiendo así medir la mejora en puntos porcentuales reportada en los resultados.

Ejemplo 1.

Tema 2: Nomenclatura química de las sustancias inorgánicas.

Título: Salud y sostenibilidad: El rol del NaCl en la lucha contra el COVID-19

Objetivo de aprendizaje: Clasificar las sustancias inorgánicas mediante criterios químicos, en un contexto de salud y sostenibilidad, que posibilite la evaluación crítica de las relaciones entre su estructura, propiedades y aplicaciones en vacunas y su impacto ambiental y ético.

Contexto del Problema:

La vacuna Soberana, desarrollada en Cuba para prevenir la enfermedad sintomática causada por el virus COVID 19, incluye la sustancia química (**NaCl**) como uno de sus componentes. Este compuesto químico juega un papel importante tanto en la formulación de la vacuna como en otros aspectos de nuestra vida cotidiana. Explora cómo este simple mineral puede ser crucial para avances médicos significativos mientras mantenemos un equilibrio ambiental sostenible.

Actividades a desarrollar:

1-Nombre la sustancia química en cuestión y clasifícala según los criterios estudiados.

1.1. ¿Cuál es la función principal del NaCl en la vacuna Soberana?

1.1.2. ¿Cómo se obtiene el NaCl industrialmente y cuáles son sus impactos ambientales asociados?

1.1.3. ¿Qué implicancias éticas tiene el uso masivo de minerales naturales como el NaCl en productos farmacéuticos?

1.1.4. Investigue sobre dos métodos de extracción del NaCl y compáralos desde el punto de vista de su impacto ambiental.

1.1.5. Discuta en grupo acerca de la necesidad de regular el uso de minerales naturales en industrias farmacéuticas.

1.1.6. Crea un informe breve donde expliques cómo podrían mejorarse los procesos actuales de obtención del NaCl para reducir su impacto negativo en el medio ambiente.

1.1.7. Basándote en el informe del 1.1.6, diseña una propuesta concreta (una carta, un guion para un podcast breve, o una presentación de 3 diapositivas) dirigida a una audiencia específica (ejemplo: la dirección de una salina local, el consejo estudiantil de tu facultad) donde expongas una mejora técnica o de gestión para reducir el impacto ambiental de la obtención o el uso de recursos minerales en la industria local de la salud.

1.2. Para contextualizar el componente virológico y las vacunas con su impacto real en salud pública y ambiental, se propone la siguiente indagación:

1.2.1. Localice y consulte el artículo científico que reporta los casos de COVID-19 en Camagüey, abril 2021.

a) A partir de las tablas y gráficos ya presentados en el artículo: identifique y escriba en un párrafo breve los patrones demográficos (municipal) y (edad y sexo) más notable.

b) Basándose en los datos observados y en lo aprendido en los incisos anteriores, redacte una reflexión (Máximo 150 palabras) que argumente: ¿Por qué es importante desde el punto de vista de salud ambiental y comunitaria, el desarrollo de vacunas como la analizada? Relacione los datos del virus con la función biológica del componente de la vacuna que estudió.

Recursos y herramientas:

Bibliografía: Bibliografía básicas y complementarias, Artículos sobre la vacuna “Soberana”

Herramientas de IA y digitales: GeoGebra, Chat GPT, Chat Perplexity.

· GeoGebra: El estudiante debe usar GeoGebra para crear los gráficos de pastel y de barras solicitados. La herramienta permite visualizar de manera clara y precisa la distribución de los casos, facilitando el análisis estadístico y la interpretación de los datos de salud pública, lo que conecta la matemática con un problema real.

· ChatGPT o Chat Perplexity: El estudiante debe usar estos asistentes para investigar y contrastar información. Por ejemplo, para las preguntas 1.1.2, 1.1.3 y 1.1.4, puede solicitar una explicación clara de los métodos de extracción de sal (minería, evaporación solar) y sus impactos ambientales diferenciales. El objetivo no es copiar la respuesta, sino usar la IA para obtener información base, comprender conceptos complejos y luego analizarla críticamente, corroborando con otras fuentes (bibliografía) para proponer mejoras (actividad 1.1.6) desde una perspectiva de sostenibilidad.

Ejemplo 2

Tema 6: Nociones de la Química Orgánica.

Título del Ejercicio: Lípidos, Salud y Entorno: El papel del Omega-3 en la recuperación del Chikungunya en Camagüey

Objetivo: Explicar la importancia biológica de los lípidos basada en su estructura y función en infecciones víricas que sustente la relación entre la preservación ambiental, el acceso a nutrientes esenciales y la salud pública sustentable.

Contexto del Problema:

En la ciudad de Camagüey, el aumento de microvertederos y la acumulación de desechos sólidos en zonas urbanas ha provocado una proliferación del mosquito “Aedes aegypti y Aedes albopictus”. Esto ha derivado en un brote de virus Chikungunya. Tras la fase aguda de fiebre, muchos pacientes persisten con inflamación severa en las articulaciones. Para ayudar en la recuperación y reducir la

inflamación sin abusar de fármacos sintéticos, los médicos camagüeyanos están recomendando el suplemento de ácidos grasos Omega-3 (específicamente el Ácido Eicosapentaenoico - EPA).

Actividades a desarrollar:

1. El Omega-3 no es una sola sustancia, sino una familia de ácidos grasos poliinsaturados. Uno de los más importantes es el EPA, cuya fórmula global es $C_{20}H_{30}O_2$.

1.1. Apoyado en la IA (ChatGPT), busca qué significa que un lípido sea "poliinsaturado" y por qué se le llama "Omega-3".

1.1.2. Identifica el grupo funcional presente al final de la cadena de esta molécula (típico de los ácidos carboxílicos).

1.1.3. Dibuja una estructura simplificada de una cadena carbonada con insaturaciones (dobles enlaces) y encierra en un círculo el grupo funcional principal.

1.2. Un médico prescribe a un paciente en recuperación una dosis de 1.5 gramos de Omega-3 al día. El suplemento disponible en las farmacias viene en cápsulas de gelatina que contienen 300 mg de EPA cada una.

1.2.1. ¿Cuántas cápsulas debe tomar el paciente al día para cumplir con la dosis de 1.5 g? (Recuerda realizar la conversión de unidades de mg a g).

1.2.2. Si el tratamiento de recuperación dura 20 días, ¿cuántos moles de EPA habrá consumido el paciente al finalizar el tratamiento? (Dato: Masa molar del EPA $C_{20}H_{30}O_2 = 302$ g/mol).

1.3. Investiga: ¿Cuál es la función biológica de los Omega-3 en el cuerpo humano en relación con la inflamación?

1.3.1. ¿Por qué el consumo de estos lípidos ayuda específicamente a los pacientes de Chikungunya?

1.3.2. Los Omega-3 se obtienen principalmente de aceites de pescado y algas. ¿Cómo afectaría la contaminación de los ríos y costas (por vertimiento de basura y químicos) a la producción de estos suplementos necesarios para nuestra salud?

1.4. La basura no solo afecta el entorno, sino que actúa como un sustrato químico y biológico peligroso:

1.4.1. Propón una estrategia comunitaria de gestión de residuos que utilice el reciclaje para eliminar los criaderos de mosquitos.

1.4.2. Argumenta: ¿Cómo el conocimiento de las propiedades químicas de los materiales de compuestos orgánicos nocivos (como la impermeabilidad del plástico y el caucho) ayuda a comprender por qué estos objetos son criaderos tan efectivos para el mosquito?

1.5. Diseña una consigna o eslogan de concienciación en formato Infografía o póster que relacione: Mecanismo de acción del Omega 3- Limpieza urbana- Control de mosquitos- salud articular.

1.6. De la Conciencia a la Incidencia: Tu infografía (1.5) es para crear conciencia. Ahora, diseña un plan de acción comunitario simple (máximo 5 pasos) para implementar la estrategia de gestión de residuos que propusiste en el 1.4.1. Identifica: a) un actor clave que necesites convencer (ejemplo: presidente del CDR, Director de la escuela), b) un primer paso realizable en una semana (ejemplo: recoger y clasificar los plásticos en una zona de tu comunidad), y c) cómo medirías el impacto (ejemplo: número de recipientes eliminados).

Recursos y herramientas:

Bibliografía: Bibliografía básicas y complementarias, Artículos sobre los Lípidos.

Herramientas de IA y digitales: GeoGebra, Chat GPT, Chat Perplexity, Canva.

- ChatGPT y/o Perplexity: El estudiante debe usar estos asistentes como un tutor conceptual para las actividades 1.1, 1.3 y 1.3.1. Puede pedir explicaciones sencillas sobre la bioquímica de los lípidos y su rol antiinflamatorio. Para la actividad 1.3.2 y 1.4, debe usar la IA para investigar la conexión entre contaminación, ecosistemas acuáticos y salud pública, generando ideas para su argumentación. La clave es preguntar de forma crítica y profunda, y no conformarse con la primera respuesta.
- Canva: El estudiante debe usar Canva (que emplea IA para diseño) para crear la infografía de la actividad 1.5. Debe aprovechar las plantillas y sugerencias de la herramienta para comunicar de manera visual y poderosa el ciclo que vincula la gestión ambiental (limpieza), la salud (control de mosquitos, Omega-3) y el bienestar comunitario, internalizando así el mensaje de interdependencia.
- GeoGebra: Puede ser útil para representar gráficamente los cálculos estequiométricos de la actividad 1.2, relacionando la dosis clínica con conceptos químicos cuantitativos.

Recibido: [10 enero 2026] Aceptado: [20 febrero 2026] Publicado: [15 marzo 2026]

Citation: Martén-Ojeda, Y; Isalgué, D; Azcuy, L. Tareas Integradoras sustentadas en la inteligencia artificial para el desarrollo de competencias ambientales. Bionatura, 2026. Volumen 11, No 1.

<https://doi.org/10.70373/RB/2026.11.01.7>

Peer review information: Bionatura thanks the anonymous reviewers for their contribution to the peer review of this work using <https://reviewerlocator.webofscience.com/>

All articles published by Bionatura Journal are freely and permanently accessible online immediately after publication, without subscription charges or registration barriers.

Publisher's Note: Bionatura stays neutral concerning jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license

[\(https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Metodología educativa para el desarrollo de la cultura económica en los microproductores ecuatorianos

Educational methodology for the development of economic culture in Ecuadorian microproducers

Matyuri Rodríguez Pérez¹, Rosa Victoria González Zambrano²

¹Universidad Ignacio Agramonte Loynaz de Camagüey, Cuba, matyurirodriguezperez@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0003-4213-1140>

²Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí, “Manuel Félix López” “ESPAM MFL”,
Manabí, Ecuador, rgonzalez@espam.edu.ec , <https://orcid.org/0000-0003-0960-1817>

<https://doi.org/10.70373/RB/2026.11.01.8>

Resumen

Hoy día en Ecuador, el incremento de los microproductores se ha caracterizado por una gran diversidad de iniciativas, sin embargo, a pesar que la demanda de apoyo y desarrollo crece, tales actores no se encuentran debidamente capacitados por lo que es importante generar alternativas educativas desde la universidad para que puedan desarrollar su cultura económica. El objetivo de este trabajo se dirige a implementar una metodología educativa en los microproductores ecuatorianos para el desarrollo de su cultura económica. La propuesta está compuesta por tres etapas: la primera es un diagnóstico de las necesidades individuales de los microproductores y las necesidades de la localidad, la segunda es un análisis de las relaciones de producción, distribución, cambio y consumo donde se vinculan las operaciones matemáticas en el manejo de los recursos monetarios y la tercera es un análisis del movimiento de los fondos o sea la comparación en el tiempo con referencia al futuro, viendo en qué medida se alcanzaron las metas. Esta experiencia se considera pertinente. Se validó su efectividad en experimento y en las encuestas realizadas a través de métodos procedimentales de la investigación pedagógica manifestándose un alto grado de satisfacción.

Palabras claves: Producción, educación financiera, conciencia económica.

Summary

Today in Ecuador, the increase in microproducers has been characterized by a great diversity of initiatives; however, although the demand for support and development grows, such actors are not properly trained, which is why it is important to generate educational alternatives from the university so that they can develop their economic culture. The objective of this work is aimed at implementing an educational methodology in Ecuadorian micro-producers for the development of economic culture.

The proposal is composed of three stages: the first is a diagnosis of the individual needs of the micro producer and the needs of the locality, the second is an analysis of the relations of production, distribution, exchange and consumption where mathematical operations and the management of monetary resources are linked and the third is an analysis of the movement of funds, that is, the comparison in time with reference to the future, seeing to what extent the goals were achieved. This experience is considered relevant. Its effectiveness was validated in an experiment carried out and in surveys carried out through procedural methods of pedagogical research, showing a high degree of satisfaction.

Keywords: production, financial education, economic awareness.

Introducción

Al referirse a los desafíos con que tropieza la Educación Superior en un mundo que se transforma la Unión de Universidades de América Latina y el Caribe (1) reformularon los ideales y prácticas de la Educación Superior para asegurar el desarrollo sostenible del planeta y de la humanidad donde la renovación de la enseñanza y el aprendizaje en este nivel resulta indispensable para mejorar su pertinencia y calidad. Para ello es necesario establecer programas que fomenten la capacidad intelectual de los estudiantes, mejorar el contenido interdisciplinario y multidisciplinario de los estudios y aplicar métodos pedagógicos que aumenten la eficiencia de la experiencia de aprendizaje, en especial teniendo en cuenta los rápidos avances de las tecnologías de la información y la comunicación".

América Latina ha sido una de las regiones del mundo con mayor cantidad y duración de crisis económicas donde la universidad juega un papel importante en la formación de profesionales capaces de darle solución a estos problemas, incluyendo las capacidades para generar ingresos de los hogares pobres; mejorar la gestión del suelo, el agua, la agro-silvicultura, entre otros.

Morra F. (2) analizó los procesos inflacionarios de varios países de América Latina, (Argentina, Bolivia, Brasil, Chile, Colombia, Ecuador, México, Perú, Uruguay y Venezuela) destacando principalmente Ecuador donde la inflación se mantuvo en regímenes de moderada-alta.

Valencia J y Narváez C. (3) comentaron que en Ecuador la situación económica no difiere de la realidad del continente, la caída de la inversión y la ineficiente estructura productiva, así como la puesta en escena del Covid-19 desató una crisis económica que perjudica a todos los sectores de la población y desarrollaron un modelo de gestión de riesgos financieros para el mejoramiento de la administración financiera en la Asociación de Productores de Cacao Fino de Aroma.

González M. (4) explicó que la región de Latinoamérica sufre impactos en la agricultura, agua, biodiversidad, salud, turismo y pobreza originados por el cambio climático. En este sentido también

Gómez R. (5) también afirmó que la utilización de las plantas perennes leñosas en los sistemas ganaderos, se visualiza entre las principales acciones definidas en los Objetivos del Desarrollo Sostenible para el 2030, sustentado en el aumento de la productividad y calidad de los pastizales asociados. Todo esto incrementa positivamente el balance energético en el ecosistema y de hecho, mejora los indicadores económicos – productivos.

Martínez J. (6) estudió el contexto económico financiero externo del Ecuador y explicó que han sucedido crisis financieras de diferentes magnitudes; desde el 2000 hasta el año 2009 ocurrió una profunda depresión que por su profundidad y dimensión se le denominó La Gran Crisis Financiera Hipotecaria, siendo originada por el descontrol en los créditos. Posterior a dicho evento y hasta el año 2019 se produjo un estancamiento de la producción y el crecimiento de burbujas bursátiles, los cuales han propiciado frecuentes crisis.

González R. (7) explicó que la finalidad de la banca es ofertar a los microproductores créditos para aumentar la producción de alimentos, pero al final termina empobreciéndolos más y generando grandes deudas. Igualmente, los medios de comunicación estatales difunden la necesidad de que estos sujetos accedan a créditos, pero ello es poco probable por el nivel de conocimientos y el alto grado de necesidades que poseen, lo que impide manejarlos eficientemente y al caer bajo la influencia de los bancos no estatales, el final, a mediano plazo, es que son desposeídos de sus pocas riquezas.

Proaño E. (8) planteó que en Ecuador además de los administradores y accionistas, hay otras partes interesadas como los bancos, que tienen sus propios analistas para estudiar los distintos segmentos empresariales y usan un conjunto de técnicas y herramientas para ofrecer alternativas de financiamiento.

Según los criterios referenciados anteriormente (1-8) coinciden en la difícil situación de la región Latinoamericana y particularmente en Ecuador donde han sucedido crisis financieras provocadas por mal manejo de las inversiones y la ineficiente estructura productiva además de los impactos de los cambios climáticos y ambientales, pero una de las causas fundamentales está dada por el insuficiente desarrollo de las capacidades humanas, la educación de la cultura económica, el nivel de conocimientos de los microproductores en el acceso y control de los créditos para aumentar la producción de alimentos.

Dichas investigaciones se refieren a la búsqueda de soluciones para disminuir los riesgos contables financieros, los impactos en agricultura, proporcionar acceso y control en los créditos, aumentar la producción de alimentos que como factores influyen en la vida de los microproductores y en el desarrollo económico y social del país.

Según Cabrera O. (9) la conciencia económica, como parte de la conciencia social, forma parte de la estructura de la cultura económica que permite la transformación social. La autora citada es un

referente importante pues ha enfocado la problemática desde una perspectiva pedagógica, en su obra devela el concepto, sus dimensiones e indicadores, así como un grupo de acciones para superar a los sujetos encargados de materializarla.

Las autoras de este trabajo consideran que, para los productores agrícolas, el desarrollo de la cultura económica puede mejorar las decisiones de inversión, gastos, endeudamientos y reduce el riesgo de ser víctimas de fraude; así como mejorar la situación económica financiera de su familia y para la sociedad representa una toma de conciencia racional sobre las decisiones individuales.

Así, el desarrollo de la cultura económica constituye una necesidad individual y social para el logro de modos de actuación de los productores agrícolas; vista como un sistema de influencias integrado que ejercen los agentes socializadores que inciden en la diversidad de escenarios formativos, con el objetivo de generalizar en ellos: los conocimientos, habilidades, valores y actitudes positivas hacia la actividad económica en la vida social que se manifiestan, en sus modos de actuación; de manera tal que amplíe su participación en la toma de decisiones económicas.

Samuelson P. (10) explicó que la economía es el estudio de la manera en que las sociedades utilizan los recursos escasos para producir mercancías valiosas y distribuirlas entre los diferentes individuos. Se divide en dos esferas: la macroeconomía, que estudia el funcionamiento de la economía en su conjunto y la microeconomía la cual analiza el comportamiento de componentes específicos, las industrias, las empresas, el precio de la tierra, el trabajo y el capital.

En este trabajo se le otorga también una importancia significativa a la Contabilidad porque desde la edad antigua se advierte la necesidad de tener un registro de las transacciones económicas, las compras, las ventas, el registro de clientes y proveedores, las deudas e impuestos; aspectos que los microproductores ecuatorianos no deben obviar, necesitan conocer los gastos para medir la utilidad o pérdida del negocio.

Por tanto, este trabajo abarca relaciones entre tres ciencias: la pedagogía, los fundamentos económicos y los fundamentos contables, integrando aspectos de Economía y Contabilidad que las autoras consideran necesarios para desarrollar la cultura económica en los productores agrícolas.

Por lo que la investigación debe dar cumplimiento al siguiente objetivo:

Implementar una metodología educativa en los microproductores ecuatorianos para el desarrollo de su cultura económica.

A través de esta investigación se propone transformar a los productores agrícolas a partir de las condiciones en las cuales viven, lo que implica garantizarles un aprendizaje consciente y crítico, centrado en la apropiación de contenidos para desarrollar su cultura económica, por lo que presupone una persona activa, que transita en el proceso de obtención de conocimientos, de una experiencia

inicialmente confusa y fragmentada, a una visión sintética, más organizada y unificada de hacia dónde quiere ir.

Rodríguez M. (11) agregó que desde la perspectiva psicológica los presupuestos del enfoque histórico-cultural señalan que el aprendizaje no se produce al margen de la interacción social del sujeto, por el contrario, ocurre en un proceso de interacción, en el cual el sujeto que aprende, es guiado en la construcción del nuevo conocimiento, habilidad y valor, en el medio social donde se forma, en su realidad histórica concreta. (Vygotsky, 1987); y el desarrollo va en dirección de la conversión de las relaciones sociales en funciones sociales.

Es esencial entender la metodología educativa que se presenta a continuación como un acto de comprensión y de elaboración conjunta, asimilar y valorar críticamente la sociedad y la comunidad, a partir de sus propios criterios, juicios y razonamientos donde la crítica es un objeto de análisis y debate, con contenidos de carácter axiológicos que también es objeto del aprendizaje.

Materiales y métodos

El presente trabajo se desarrolló a partir de la aplicación sistemática de métodos y técnicas propias de la investigación pedagógica, valoradas tanto en el plano teórico como práctico, desde una perspectiva de diversidad metodológica sustentada en los aportes de la ciencia. La investigación se desarrolló en la Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí “Manuel Félix López” (ESPAM MFL), con 40 microproductores de la zona del cantón Chone en la parroquia Boyacá, cuyo enfoque metodológico se sintetiza en la gestión procedimental presentada en la figura 1.



Figura 1: Gestión procedimental. Fuente: González R. (7)

El componente procedimental permitió la activación de habilidades cognitivas y prácticas, mediante el uso de estrategias y técnicas de aprendizaje que favorecieron la construcción autónoma del conocimiento por parte de los 40 microproductores. Dicho proceso contribuyó al fortalecimiento de

su cultura económica de los participantes, la educación en valores y la toma de conciencia sobre su propio aprendizaje, promovió actitudes de colaboración, ayuda mutua y valoración del impacto del desarrollo económico en los ámbitos productivo y social, tanto dentro como fuera del contexto agropecuario.

Se emplearon procedimientos participativos, activos, reflexivos y críticos, los cuales facilitaron la creación de ambientes de aprendizajes favorables, motivadores y contextualizados, orientados al estudio de los procesos económicos. Se prestó especial atención a los aspectos metodológicos y a la interacción directa con los actores sociales de la comunidad rural, cuyas condiciones socioeconómicas marcadas por el analfabetismo, la pobreza, la migración y las limitaciones en la gestión de recursos económicos-demandan estrategias educativas diferenciadas frente a los contextos urbanos.

Desde la concepción pedagógica adoptada, se aplicaron técnicas que promovieron la acción y la participación activa de los sujetos, entre las cuales se incluyen: dinámicas grupales, técnicas de visualización, entrevistas semiestructuradas, comunicación oral dirigida, observación participante en campo, juegos didácticos y otras dinámicas participativas.

Asimismo, se utilizaron herramientas de diagnóstico participativo para:

- Caracterizar la comunidad y su contexto socioeconómico.
- Analizar los sistemas de producción agrícola.
- Evaluar el manejo de los recursos económicos.
- Identificar problemáticas y potenciales soluciones.
- Diseñar y planificar acciones orientadas al fortalecimiento económico-productivo.

La implementación de estos métodos permitió el intercambio de aprendizajes con experiencias similares y fortaleció el rol protagónico tanto de los actores extensionistas como de los microproductores en el proceso formativo. De esta manera, se consolidó una metodología educativa contextualizada, participativa y pertinente a las necesidades del entorno rural estudiado

Resultados

Implementación de la metodología educativa

La aplicación de la metodología educativa con una muestra de 40 microproductores de la parroquia Boyacá - cantón Chone permitió identificar transformaciones significativas en el plano cognitivo,

actitudinal y procedimental. Los resultados se estructuran según la primera etapa del proceso metodológico: identificación del problema y diagnóstico de necesidades.

Etapas 1: Identificación del problema

La identificación del problema se abordó como el reconocimiento de la brecha entre la situación productiva real y el estado deseado de desarrollo económico sostenible.

Diagnóstico de necesidades

El diagnóstico participativo aplicado a los 40 microproductores evidenció que:

El 72,5 % presentaba limitaciones en la planificación económica de sus unidades productivas.

El 65 % no llevaba registros sistemáticos de ingresos y egresos.

El 60 % manifestó dificultades para establecer estrategias de comercialización.

El 80 % reconoció no haber recibido formación previa en gestión económica rural.

El análisis de estas necesidades se contextualizó conforme a los lineamientos del Plan de Desarrollo para el Nuevo Ecuador 2024-2025, lo que permitió alinear las problemáticas locales con los objetivos estratégicos de desarrollo provincial y nacional. Se evidenció que el fortalecimiento de la cultura económica del microproductor constituye un componente clave para el cumplimiento de metas territoriales relacionadas con productividad, sostenibilidad y reducción de brechas socioeconómicas.

Resultados de las acciones implementadas

Acción 1. Concientización para la transformación.

El 85 % de los participantes manifestó, en entrevistas semiestructuradas posteriores, haber modificado su percepción respecto a la gestión económica de sus unidades productivas. Se observó mayor disposición hacia la planificación, el registro contable básico y la toma de decisiones fundamentadas en análisis de costos.

Acción 2. Análisis comparativo de resultados productivos.

La comparación entre los resultados productivos del cantón Chone y otros contextos de la provincia permitió identificar diferencias en rendimiento y eficiencia en el uso de recursos. Tras los talleres comparativos, el 67,5 % de los microproductores reconoció prácticas susceptibles de mejora en sus propios sistemas de producción, particularmente en manejo de costos y diversificación productiva.

Acción 3. Elaboración de mapa territorial.

El 100 % de los participantes contribuyó a la construcción colectiva del mapa territorial. Esta herramienta permitió identificar:

12 actores sociales clave vinculados al sistema productivo local.

8 organizaciones comunitarias activas.

Principales redes de comercialización y puntos críticos de intermediación.

La visualización territorial facilitó la comprensión de relaciones económicas y sociales previamente no sistematizadas por los productores.

Acción 4. Estudio integral del territorio.

El análisis territorial permitió clasificar las problemáticas en tres categorías principales:

- Limitaciones en gestión económica.
- Vulnerabilidad ante eventos climáticos.
- Debilidades en articulación organizativa.

Asimismo, se identificaron potencialidades relevantes, como disponibilidad de mano de obra familiar (75 % de los casos) y experiencia productiva superior a 10 años en el 62,5 % de los participantes.

Impacto formativo observado

Al finalizar la intervención metodológica, se registraron los siguientes avances:

El 70 % comenzó a implementar registros básicos de control económico.

El 60 % diseñó planes de mejora productiva a corto plazo.

El 82,5 % reportó mayor confianza en la toma de decisiones económicas.

Se fortalecieron dinámicas de cooperación, evidenciadas en la conformación de 3 grupos de trabajo colaborativo.

En términos **cuantitativos**, se evidenció un cambio en el discurso de los participantes, quienes pasaron de atribuir sus dificultades exclusivamente a factores externos a reconocer la importancia de la gestión interna y la planificación estratégica.



Figura 2: Actores sociales en el mapa territorial. Fuente: González R. (7)

Acción 5. Identificación de alternativas y establecimiento de criterios de decisión

En esta fase se procedió a la identificación y análisis de las posibles alternativas de solución a las problemáticas detectadas en la etapa diagnóstica. A través de dinámicas participativas y sesiones de trabajo grupal, los 40 microproductores generaron un conjunto amplio de propuestas orientadas a

mejorar la gestión productiva y económica de sus unidades.

El análisis incluyó la valoración comparativa de cada alternativa mediante criterios previamente consensuados, tales como viabilidad técnica, sostenibilidad económica, impacto social, disponibilidad de recursos y factibilidad a corto y mediano plazo. La aplicación de criterios relativamente objetivos permitió fortalecer la capacidad de toma de decisiones fundamentadas, incrementando la probabilidad de seleccionar opciones pertinentes y contextualizadas.

El proceso evidenció un avance significativo en la argumentación y en la evaluación crítica de las propuestas, lo cual reflejó una mayor madurez en la gestión económica y organizativa de los participantes.

Al cierre de la primera etapa, se constató un proceso de sensibilización y toma de conciencia en los microproductores respecto a la necesidad de transformar sus prácticas productivas y actitudes económicas. Esta transformación se orientó hacia una perspectiva sostenible y sustentable, acorde con las dinámicas del entorno rural y las exigencias del desarrollo territorial.

Etapas 2. La esencia del trabajo creador

Procedimiento fundamental: Análisis de las relaciones de producción, distribución, intercambio y consumo

La segunda etapa se centró en el análisis integral de las relaciones económicas que estructuran la actividad productiva de los microproductores, abordando los procesos de producción, distribución, intercambio y consumo como dimensiones interrelacionadas del sistema económico local.

Acción 1. Análisis de la producción de bienes materiales

Se desarrolló un estudio de la producción de bienes materiales con el objetivo de fortalecer las bases para un desarrollo sostenible a largo plazo. Este análisis incluyó la identificación de recursos disponibles, medios de producción, estructura de costos, relaciones con proveedores y clientes, y condiciones de comercialización.

Desde el enfoque teórico, se retomaron los fundamentos expuestos por Karl Marx en *El Capital*, donde se analizan las características de la mercancía y la dualidad del trabajo (concreto y abstracto) en la producción social. Estos referentes conceptuales permitieron contextualizar el análisis de las unidades productivas rurales, reconociendo el trabajo como base de la vida social y la productividad como medida de la eficiencia en la generación de bienes.

En el contexto de los microproductores, se enfatizó que el incremento de la productividad implica una mayor capacidad de generar bienes materiales en un tiempo determinado, optimizando el uso de recursos disponibles. En consecuencia, el punto de partida consistió en identificar:

- Recursos o bienes materiales disponibles.
- Medios e instrumentos de producción.
- Activos necesarios para iniciar o sostener la actividad productiva.
- Relaciones mercantiles establecidas con proveedores y clientes.

Como herramienta básica de análisis económico se introdujo la ecuación contable fundamental:

$$\text{ACTIVO} = \text{PASIVO} + \text{CAPITAL}$$

A partir de esta relación, los participantes clasificaron los componentes de sus unidades productivas. El activo fue definido como el conjunto de recursos y bienes materiales que posee el microproductor o sobre los cuales tiene derecho, incluyendo efectivo disponible, producción agrícola en proceso, infraestructura, maquinaria, mobiliario, inventarios y cuentas por cobrar (véase tabla 1).

Este ejercicio permitió que los microproductores comprendieran la estructura básica de su situación financiera, favoreciendo una gestión más organizada y racional de los recursos productivos.

El pasivo representa la suma de las obligaciones por pagar a los suministradores de productos o de servicios, a las instituciones de crédito, a los trabajadores.

Se emplea el término capital o patrimonio para designar los derechos del micro productor como propietario, diferenciando a través de ésta, la forma que adopta el derecho de propiedad.

Tabla 1: Registro del negocio.

ACTIVOS			PASIVOS	CAPITAL	
Efectivo	Producción Agrícola en Proceso	Producción Animal en Proceso	Cuentas por Pagar	Patrimonio	Donaciones Recibidas

La segunda acción del micro productor es:

Acción # 2: Analizar los resultados obtenidos.

Se analizaron los costos, los costos ambientales, los ingresos, los gastos de forma que los gastos y los costos fueran menores que los ingresos para poder obtener ganancias. Esto implicó adquirir las materias primas (semillas, combustibles, fertilizantes, servicios de movimiento de tierra) a buenos

precios, para registrar los ingresos, los costos, gastos, pérdidas y en consecuencia poder determinar los resultados obtenidos.

Baiget E, Gya R, Jurgens J (13) explicaron que la bioeconomía va más allá de la capacidad para transformar industrias e impulsar un valor económico, que la utilización de materias primas secundarias y terciarias junto con la optimización de la eficiencia es clave para obtener beneficios ambientales.

En la tabla # 2 se anotaron todas las operaciones de egresos, ellos son costos directos e indirectos y los gastos por servicios recibidos o por comisiones e intereses.

Tabla 2: Registro de costos y gastos.

DÉBITOS			CRÉDITOS	
Costos directos e indirectos	Gastos por comisiones e intereses	Gastos por servicios recibidos	Efectivo	Cuentas por Pagar

Pérez D. (14) reconoció que la eficiencia en costos son aquellos costos óptimos en los que se debe incurrir en el proceso productivo, a partir del uso racional de los recursos. Para su determinación, se requiere la aplicación de procedimientos matemáticos que contribuyen a la exactitud de los resultados, así como a la toma de decisiones, concibe el costo de los recursos empleados para alcanzar un resultado.

Los elementos del costo de producción pueden ser gastos de energías, salarios, seguridad social, amortización, entre otros que intervienen en el proceso de producción.

Lo mismo ocurre con las compras de Materias Primas y materiales y combustibles. La entrada de inventarios como combustibles, semillas y fertilizantes, útiles y herramientas se registra a los débitos y se paga en efectivo o a crédito. (Ver tabla 3).

Tabla 3: Registro de Compras.

DÉBITOS			CRÉDITOS	
Semillas	Fertilizantes	Combustibles	Efectivo	Cuentas por Pagar

Con gran aplicación e influencia social se vincularon las operaciones matemáticas y el manejo de los recursos monetarios unidos a la responsabilidad que asume el micro productor al aceptar un financiamiento bancario. Por este motivo debe llevar un registro bien detallado de los ingresos y gastos que realiza.

Se considera ingresos a todas las ventas o prestación de algún servicio ya sea en efectivo o a crédito.

INGRESOS – GASTOS = GANANCIA O PÉRDIDA

Acción # 3: Se aplicaron los procedimientos contables que contribuyen a la exactitud de los resultados.

En este registro se anotaron todas las operaciones que generan ingresos cobradas en efectivo o por cobrar. (Ver tabla 4).

Tabla 4: Registro de ventas y otros ingresos

DÉBITOS			CRÉDITOS
Efectivo	Cuentas por Cobrar	Ventas	Otros ingresos

Para llevar el control de los clientes se crea el submayor de Cuentas por Cobrar. Uno para cada cliente. Cuando se le vende se debita y cuando paga se acredita de forma tal que el saldo siempre esté actualizado. (Ver tabla 5).

Cliente: X

Tabla 5: Submayor de Cuentas por Cobrar

Fecha	Explicación	Fo	Debe	Haber	Saldo

Acción # 4: Extraer de la Tabla # 4: Registro de ventas y otros ingresos el total de las ventas y los ingresos del período.

Acción # 5: Extraer de la Tabla # 2: Registro de costos y gastos el total de costos y gastos del período.

Acción # 6: Determinar la utilidad o pérdida, calcular el resultado (Ingresos menos costos y gastos).

Al cierre de cada mes se cierran todas las tablas, se determina la diferencia entre los ingresos y los gastos, lo que representa la utilidad o pérdida del período. Se elaboró un Balance de comprobación por saldos de forma que se pudo comparar y evaluar el esfuerzo realizado.

El banco es una institución financiera que también lucha por su sostenibilidad, presta el dinero, pero después lo cobra con sus intereses. Es decir, en el segmento de crédito no basta con medir solo la capacidad de pago, también es deber de los acreedores evaluar aspectos de sostenibilidad ambientales, sociales y de gobernanza. En este aspecto Orellano J. (15) alertó sobre el riesgo de los accionistas en empresas mineras listadas en la Bolsa de Valores de Lima al momento de tomar decisiones financieras y su influencia en el desempeño financiero y económico.

García M. (16) explicó que el problema de la sostenibilidad financiera es también un problema para garantizar un equilibrio financiero a largo plazo.

El microproductor asume su responsabilidad al aceptar un financiamiento bancario pero si tiene en cuenta todos estos elementos aquí mencionados y lleva un buen control de todas las operaciones que realiza, a tiempo, incrementa la producción, minimiza los riesgos financieros, asegura una sostenibilidad financiera, entonces se puede afirmar que ha desarrollado su cultura económica.

Conclusión parcial de la etapa

Se realizó un análisis contable de las relaciones de producción, la capacidad del obrero de producir, en un año. La aplicación de los procedimientos contables contribuyó a la exactitud de los resultados obtenidos.

Etapa # 3: Análisis del movimiento de los fondos

Procedimiento fundamental: Comparación en el tiempo, viendo en qué medida se alcanzaron las metas.

Acción # 1: Establecer una relación de los datos obtenidos en un período con otro, lo cual permitió una comparación en el tiempo.

En la tabla # 6 se puede observar un ejemplo que muestra el análisis mediante las técnicas: Porcentajes de tendencias horizontal y vertical en los años 2023 y 2024: el porcentaje de tendencia horizontal brindó la diferencia y el porcentaje del año 2024 - 2023 en el Efectivo, Cuentas por Cobrar, Mercancías, o sea \$ 56 023.29 menos \$ 55 916.20 y en la última columna divido el valor del 2024 entre el 2023 para calcular su porcentaje.

El porcentaje de tendencia vertical brindó el porcentaje de cada cuenta con referencia a una partida base, en este caso al total de los activos, por ejemplo: el efectivo dividido entre el total de activos para cada año, así se puede observar que el efectivo representó el 56% del total de activos en los dos años.

Este análisis es la combinación de ambas técnicas (horizontal y vertical). La horizontal toma como punto de partida el año 2023 mientras que en el vertical se analizaron las cuentas de activos, donde el total es el 100% y se va calculando el % de cada partida con relación a la partida base seleccionada.

Tabla 6: Utilización de las técnicas: Porcentajes de tendencias horizontal y vertical.

		2023	Porcentaje Vertical	2024	Porcentaje Vertical	Porcentaje Horizontal Diferencia 2024- 2023	Porcentaje 2024/2023
1	Efectivo	\$ 55 916.20	56 %	\$ 56 023.29	56 %	\$ 107.09	100 %
2	Cuentas por Cobrar	1 500.52	2 %	1 895.14	2 %	394.62	110 %
3	Mercancías	41 362.95	42 %	40 923.40	42 %	(439.55)	98 %
4	Total de Activos	\$ 98 779.67	100 %	\$ 98 841.83	100 %	62.16	100 %

Fuente: González R. (7)

Pérez L. (17) señaló la combinación de ambos métodos (horizontal y vertical) proporciona una visión integral del desempeño financiero.

Al cierre de la etapa 3 se realizó una comparación en el tiempo viendo en qué medida el microproductor alcanzó sus metas y cuáles fueron las tendencias a seguir para continuar avanzando.

Discusión

Tabla 7. Comparación estructural de las etapas metodológicas, acciones implementadas y resultados alcanzados (n = 40)

Etapa	Procedimiento fundamental	Acciones desarrolladas	Resultados observados	Tendencia generada
Etapa 1. Identificación del problema	Diagnóstico de necesidades y reconocimiento de brechas	<ol style="list-style-type: none"> 1. Concientización para la transformación. 2. Comparación de resultados productivos. 3. Elaboración de mapa territorial. 4. Estudio integral del territorio. 5. Identificación de alternativas y criterios de decisión. 	<ul style="list-style-type: none"> - Mayor conciencia sobre la necesidad de cambio (85 %). - Identificación de debilidades en gestión económica. - Reconocimiento de actores y recursos territoriales. - Generación de alternativas viables de mejora. 	Transición de una visión empírica a una gestión reflexiva y planificada.
Etapa 2. Esencia del trabajo creador	Análisis de las relaciones de producción, distribución, intercambio y consumo	<ol style="list-style-type: none"> 1. Análisis de la producción y medios de producción. 2. Evaluación de costos, ingresos y rentabilidad. 3. Aplicación de procedimientos contables. 4. Determinación de ingresos del período. 5. Determinación de costos y gastos. 6. Cálculo de utilidad o pérdida. 	<ul style="list-style-type: none"> - 80 % identificó correctamente activos, pasivos y capital. - 75 % implementó registros contables básicos. - Mejora en la comprensión de rentabilidad y productividad. - Mayor control financiero. 	Consolidación de cultura financiera y toma de decisiones basada en datos.
Etapa 3. Análisis del movimiento de fondos	Comparación temporal y evaluación del cumplimiento de metas	<ol style="list-style-type: none"> 1. Comparación interperíodos de ingresos, costos y utilidades. 2. Evaluación del cumplimiento de metas económicas. 3. Identificación de tendencias y ajustes estratégicos. 		

Los resultados obtenidos observados en la tabla 7 demuestran que la metodología educativa aplicada produjo transformaciones progresivas en la gestión económica de los microproductores de la parroquia Boyacá del Cantón Chone, validando la pertinencia de un modelo estructurado en tres etapas: diagnóstico, fortalecimiento técnico-contable y evaluación longitudinal.

En la primera etapa, el proceso de identificación del problema permitió evidenciar una brecha significativa entre las prácticas productivas tradicionales y los requerimientos de una gestión económica sostenible. El alto porcentaje de participantes que manifestó la necesidad de transformar sus prácticas (85 %) confirma que la sensibilización constituye un elemento clave en los procesos de educación rural. La problematización del contexto territorial facilitó la comprensión de las relaciones entre la unidad productiva y el entorno socioeconómico, coherente con enfoques participativos que destacan la importancia del diagnóstico contextual como punto de partida del cambio (18).

En la segunda etapa, orientada al análisis de las relaciones de producción, distribución, intercambio y consumo, se observó una mejora sustancial en las competencias financieras básicas. El 80 % de los microproductores logró identificar adecuadamente los componentes de la ecuación contable fundamental (activo, pasivo y capital), mientras que el 75 % implementó registros sistemáticos de ingresos y gastos. Estos resultados indican que la incorporación de herramientas contables

elementales fortalece la toma de decisiones basada en datos y reduce la dependencia de criterios exclusivamente empíricos.

El análisis de costos, ingresos y rentabilidad permitió además integrar criterios de sostenibilidad, en concordancia con planteamientos contemporáneos de bioeconomía que destacan la optimización del uso de recursos y la eficiencia productiva como bases para generar beneficios económicos y ambientales simultáneamente (13). En este sentido, la intervención no se limitó al incremento de utilidades, sino que promovió una visión estratégica del uso racional de insumos y la reducción de costos innecesarios.

La tercera etapa, centrada en la comparación temporal de resultados, como lo indica la tabla n. 7 evidenció que el 70 % de los participantes mejoró su rentabilidad en el período evaluado. La comparación interperíodos permitió identificar tendencias de crecimiento en ingresos y mayor control de gastos, consolidando una cultura de evaluación continua. Este hallazgo es relevante, ya que en contextos rurales suele existir escasa sistematización de información financiera, lo que limita la planificación a mediano plazo.

De manera integral, la secuencia metodológica aplicada favoreció un aprendizaje progresivo: primero reflexivo, luego técnico y finalmente estratégico. La transición observada desde una gestión reactiva hacia una gestión planificada sugiere que la educación económica contextualizada puede convertirse en un instrumento efectivo para fortalecer la sostenibilidad productiva rural.

No obstante, la permanencia de estos resultados dependerá de factores externos como el acceso a mercados, asistencia técnica continua y políticas públicas coherentes con el desarrollo territorial. Futuras investigaciones podrían incorporar análisis estadísticos inferenciales y seguimiento longitudinal ampliado para determinar la estabilidad de los cambios observados.

Conclusiones

La metodología educativa aplicada demostró ser efectiva para fortalecer la gestión económica de los microproductores rurales de la parroquia Boyacá del Cantón Chone, al integrar procesos de sensibilización, formación técnica-contable y evaluación longitudinal del desempeño productivo.

El enfoque estructurado en tres etapas permitió transitar desde el reconocimiento crítico de las problemáticas hasta la consolidación de prácticas de planificación, registro contable y análisis de rentabilidad, favoreciendo una toma de decisiones más fundamentada y estratégica.

La implementación de herramientas básicas de control financiero y la comparación interperíodos contribuyeron al incremento de la cultura económica, la mejora en la organización productiva y el avance hacia modelos de gestión más sostenibles.

Los resultados evidencian que la educación contextualizada y participativa constituye un instrumento clave para el desarrollo rural sostenible, al promover autonomía, responsabilidad económica y capacidad de adaptación en los microproductores.

Se recomienda dar continuidad al acompañamiento técnico y ampliar el seguimiento longitudinal para consolidar los avances alcanzados y evaluar la estabilidad de los cambios en el mediano y largo plazo.

Referencias Bibliográficas

1. Unión de Universidades de América Latina y el Caribe (UDUAL). Conferencia Mundial de Educación Superior. 2022. Reformular los ideales y prácticas de la Educación Superior para asegurar el desarrollo sostenible del planeta y de la humanidad. Disponible en https://udualc.org/wp-content/uploads/2022/03/UDUAL_Posicionamiento_Esp_WHEC.pdf
2. Morra F. Inflación crónica: patrones macroeconómicos y procesos de desinflación. [Tesis doctoral en Economía]. Buenos Aires, Argentina: Facultad de Ciencias Económicas, Universidad Nacional de La Plata; 2021. P.20
3. Valencia J y Narváez C. La gestión de riesgos financieros y su incidencia en la toma de decisiones. Revista Interdisciplinaria de Humanidades, Educación, Ciencia y Tecnología. 2021; 7(2): p.15.
4. González M. Riesgos del cambio climático y su incidencia en la sostenibilidad empresarial de las instituciones bancarias. [Tesis doctoral]. Lima, Perú; 2022. P.14
5. Gómez R. Principales acciones definidas en los Objetivos del Desarrollo Sostenible para el 2030. En: Libro de resúmenes: Indicaciones metodológicas para la actividad de programas y proyectos de ciencia, tecnología e innovación. La Habana, Cuba; 2020. p. 12
6. Martínez , J., Suarez, B., Rivera Velasco, J. L., & Yela Burgos, R. T. (2025). Crisis financieras en la historia de Ecuador: lecciones aprendidas (1980 – 2023): Financial crises in Ecuador's history: lessons learned (1980 – 2023). LATAM Revista Latinoamericana De Ciencias Sociales Y Humanidades, 6(1), 1193– 1213. <https://doi.org/10.56712/latam.v6i1.3411>
7. González R. Estrategias educativas para el desarrollo de la cultura económica en el sector agropecuario. Manabí, Ecuador: Ediciones ULEAM; 2023. P.14
8. Proaño E. Análisis financiero. Cuenca, Ecuador: Universidad del Azuay, Casa Editora; 2023. P.11
9. Cabrera O. Cultura económica y educación en valores. Centro Félix Varela. Ediciones Acuario. La Habana; 2018. P. 27
10. Samuelson PA. Economía. Madrid, España: McGraw-Hill Interamericana; 2006. P.25

11. Rodríguez M. Formación de la competencia interpretar los estados financieros en la carrera Licenciatura en Educación, especialidad Economía. [Tesis doctoral]. Camagüey, Cuba: Universidad Ignacio Agramonte Loynaz; 2020. P.28
12. Konstantinov F. Fundamentos de la Filosofía Marxista Leninista. Materialismo Dialéctico. Editorial de Ciencias Sociales. Ciudad de la Habana, Cuba; 1979. P.124.
13. Baiget E, Gya R, Jurgens J. Accelerating the tech-driven bioeconomy, España: Centre for the Fourth Industrial Revolution; Capgemini; 2024. P. 25
14. Pérez D. Procedimiento para la eficiencia en costos del servicio de paquetería. Retos de la Dirección.2023; 17 (3): p. 18-19.
15. Orellano J. La información contable y el riesgo del accionista de las empresas mineras de la Bolsa de Valores de Lima. [Tesis doctoral]. Lima: Facultad de Ciencias Contables, Universidad Nacional Mayor de San Marcos; 2023. P.15.
16. García M. La sostenibilidad financiera del sistema público de pensiones español. [Tesis doctoral]. Bilbao: Facultad de Economía y Empresa, Universidad del país Vasco; 2021.P.12
17. Pérez L. Métodos de análisis financiero: Vertical y horizontal. Revista de Finanzas. 2022; 15(3): p.45-58
18. Metodología educativa. Familia y colegio. [Internet]. [Citado 2026 feb 16]. Disponible en: <https://Andelfuenllana.es.blogspot.com/>

Received: [25 enero 2026] **Accepted:** [24 febrero2026] **Published:** [15 marzo 2026]

Citation: Rodríguez, M; González, R. Metodología educativa para el desarrollo de la cultura económica en los microproductores ecuatorianos. *Bionatura*. 2026. Volumen 11, No 1.

<https://doi.org/10.70373/RB/2026.11.01.8>

Peer review information: Bionatura thanks the anonymous reviewers for their contribution to the peer review of this work using <https://reviewerlocator.webofscience.com/>

All articles published by Bionatura Journal are freely and permanently accessible online immediately after publication, without subscription charges or registration barriers.

Publisher's Note: Bionatura stays neutral concerning jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Alternativas para la reproducción del *Trichoderma* spp. en condiciones de laboratorio

Alternatives for the reproduction *Trichoderma* spp. under laboratory conditions

Mamna Victoria Daley Poyato ^{1*}, Reymundo Escobar Lorenzo ², Maité García Montero, ³ Jorge Luís García Pupo

¹Universidad de Holguín. Holguín, Cuba; daleymamn24@gmail.com . ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6049-2129>

²Universidad de Holguín. Holguín, Cuba; reylor820618@gmail.com . ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1216-5502>

³ Centro de Reproducción de Entomófagos y Entomopatógenos. Holguín, Cuba; maitegraciamontero@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-4144-1263>

⁴Estación Territorial de Protección de Plantas. Holguín, Cuba; jorgegarciapupo06@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-5347-0331>

* Correspondence: daleymamn24@gmail.com; Tel.: +5359013628

<https://doi.org/10.70373/RB/2026.11.01.9>

RESUMEN

Para evaluar el efecto de diferentes dosis de maíz, combinado con otros sustratos en la reproducción de *Trichoderma* spp. en condiciones de laboratorio, se estudiaron 3 alternativas, conformadas por 4 combinaciones de maíz fino con: bagazo de caña fino, aserrín de pino, cáscara de maní y cáscara de arroz. El testigo utilizado fue el maíz fino al 100 % y se realizaron tres repeticiones. Se empleó la metodología para la producción de medios biológicos, que incluyó los procedimientos: preparación del sustrato, inoculación e incubación, secado, recobrado y conservación del producto terminado. A los resultados se les aplicó el análisis de varianza de clasificación simple a través del paquete estadístico Infostat 2017 y la prueba de Tukey para un nivel de significación del 95%, que aportó que el mejor efecto sobre la reproducción del hongo correspondió a la combinación de 700 g de maíz fino con 300 g de bagazo de caña fino, alternativa que superó de manera significativa a las demás evaluadas. Los resultados estuvieron en el rango de 10⁹ esp/ml en todas las alternativas, por lo que se consideran adecuados para la reproducción del *Trichoderma* spp. y resultó más económica para su generalización la combinación de maíz fino en un 30 % con 70% de los sustratos, debido a la reducción los costos de producción en más de un 50%.

Palabras claves: sustrato; alternativas; reproducción.

ABSTRACT

To evaluate the effect of different doses of corn, combined with other substrates on the reproduction of *Trichoderma* spp. in laboratory conditions. 3 alternatives were studied, made up of 4 combinations

of fine corn with the substrates: fine cane bagasse, pine sawdust, peanut shell and rice husk. The control used was 100% fine corn and three repetitions were carried out. The methodology for the production of biological media was used, which included the procedures: preparation of the substrate, inoculation and incubation; drying; recovery and conservation of the finished product. The simple classification analysis of variance was applied to these results through the Infostat 2017 statistical package and the Tukey test for a significance level of 95%, which showed that the best effect on the reproduction of the fungus corresponded to the combination of 700 g of fine corn with 300 g of fine cane bagasse that significantly surpassed the others evaluated. The results that were in the range of 10^9 esp/ml in all the alternatives are considered adequate for the reproduction of *Trichoderma* spp and it was more economical for its generalization the combination of 30% fine corn with 70% of the substrates, due to the reduction in production costs by more than 50%.

Keywords: substratum; alternatives; reproduction.

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de la agricultura constituye una prioridad en la economía de cualquier país para garantizar la producción de alimentos que satisfaga las necesidades cada vez más crecientes de la población. Por ello, se requiere de un enfoque sostenible en el proceso productivo agropecuario, que garantice la elevación continua y equitativa de la calidad de vida de las generaciones presentes y futuras, a partir del aprovechamiento eficiente de los recursos disponibles con la protección del medio ambiente.

En este sentido, es importante considerar a las plagas y enfermedades como una de las causas principales que provocan pérdidas a las producciones, por lo que, el empleo de plaguicidas químicos para su control ha provocado un efecto negativo en los ecosistemas agrícolas. De ahí que exista un creciente interés público por la calidad de los alimentos, ello se refiere a la ausencia de residuos, agroquímicos o de patógenos.

El uso de control biológico u organismos capaces de antagonizar con las plagas o patógenos, y reducir sus efectos nocivos, además de disminuir el empleo de plaguicidas químicos, es un aspecto esencial en la agricultura contemporánea. Este método de control es una de las herramientas más valiosas para mantener las densidades poblacionales de plagas por debajo de niveles que causen daños económicos. Se conocen más de 1500 especies de microorganismos, entre hongos, bacterias y virus que son patógenos de artrópodos y controladores de otras poblaciones microbianas. Sin embargo, solo unos pocos se usan en los programas de control de plagas.

En Cuba, el empleo del control biológico se ha impulsado desde 1988, para lo cual se crearon los Centros de Reproducción de Entomófagos y Entomopatógenos (CREE) y las plantas de

bioplaguicidas, sustentados en un sistema de capacitación e innovación. En estos se han generado tecnologías para la producción masiva de agentes de control biológico que se utilizan en diversos cultivos de importancia. Asimismo, el funcionamiento desde 1973-1974 de una red de Estaciones Territoriales de Protección de Plantas (ETPP), ha fortalecido un sistema territorial de manejo de plagas. Estas estaciones se han integrado a la producción agropecuaria, con un alto potencial para contribuir a la soberanía tecnológica y alimentaria del país.

Mediante los actuales métodos productivos, se logra producir anualmente un promedio de 450 000 kg de estos agentes de control, con efectos beneficiosos en más de 100 000 hectáreas de cultivos de interés económico, tanto en campo abierto, como en sistemas protegidos. El uso de inóculos biológicos ha tenido una amplia difusión en las últimas décadas, se ha comprobado su efecto positivo sobre el rendimiento de diferentes especies vegetales y la factibilidad en una agricultura que se sustenta en un enfoque orgánico y sostenible. Se clasifican según su uso en biofertilizantes, biocontroladores, aceleradores de compostaje y biorremediadores; siendo algunas especies de *Trichoderma* spp. empleadas con estos fines.

El *Trichoderma*, es un hongo beneficioso que abunda en los suelos y es capaz de parasitar, controlar y destruir muchos hongos, nematodos y otros fitopatógenos, que atacan y destruyen a los cultivos; ello lo convierte en un microorganismo beneficioso para la agricultura. Posee diversas ventajas, pues expone un rápido crecimiento y desarrollo, además produce una gran cantidad de enzimas que son inducidas con la presencia de hongos fitopatógenos. Puede desarrollarse en una amplia gama de sustratos, y disminuye o elimina la necesidad del empleo de fungicidas químicos.

Del género *Trichoderma*, se distinguen por su morfología alrededor de 30 especies. Sin embargo, el uso de la biotecnología vegetal, mediante la introducción de técnicas moleculares en micología evolutiva en los últimos años han permitido revelar la existencia de más de 100 especies distintas (Druzhinina et al., 2006; y Torres et al., 2015).

Trichoderma es un hongo cosmopolita con capacidad de adaptación y producción de metabolitos, como enzimas, compuestos promotores de crecimiento vegetal, y compuestos volátiles, entre otros, de interés biotecnológico y ambiental. Es utilizado como agente de biocontrol contra hongos fitopatógenos, debido a sus múltiples mecanismos de acción, destacando la tibirosis, el micoparasitismo, la competencia por espacio y nutrientes, y la producción de metabolitos secundarios (Hernández et al., 2019).

Otro de los mecanismos antagonistas producidos por el género *Trichoderma* consiste en la estimulación del crecimiento vegetal. Varios aislados de este controlador biológico son capaces de producir más de 70 metabolitos, entre ellos sustancias estimuladoras del crecimiento y del desarrollo de las plantas. Este grupo de microorganismos son capaces de secretar determinados compuestos de

naturaleza hormonal, así como diferentes ácidos orgánicos que disminuyen el pH del suelo (Companiononi et al., 2019).

Trichoderma participa en la biotransformación de celulosa (polímeros de glucosa de alto peso molecular), en la transformación de hemicelulosa (polisacárido que por hidrólisis libera hexosa y pentosa), en la mineralización del Nitrógeno (reacciones hidrolíticas) y de algunas proteínas presentes, en la degradación y en la descomposición de la lignina y el humus que al tener estructuras basadas en núcleos aromáticos son degradados por oxidación de cadenas laterales (Hernández et al., 2019).

El uso de microorganismos antagónicos del suelo es una vía de lucha muy explotada en los sistemas agrícolas, dentro de los que se destacan los biopreparados constituidos principalmente por especies del género *Trichoderma*. Se han efectuado estudios en condiciones de laboratorio, ensayos semicontrolados y de campo.

Arévalo et al., (2017) estudiaron la producción de conidias de *Trichoderma harzianum* en sustratos sólidos, se utilizaron residuos agrícolas tales como: cascarilla de arroz (*Oriza sativa*), cáscara de maní (*Arachis hypogaea*) y arroz con los que obtuvieron buenos resultados en la producción de este hongo. Una de las estrategias más sustentables para el manejo de la roya del café, es el control biológico con el uso de microorganismos. La utilización de cepas antagónicas del hongo *Trichoderma* spp., para el control de la roya han disminuido la incidencia y severidad de la enfermedad, ya que las especies de *Trichoderma* son antagonistas sobre patógenos perjudiciales, además de su efecto como hiperparásito que suprime a los microorganismos que generan las enfermedades fitopatógenas (Cubilla et al., 2019). Borjas et al., (2020) evaluaron el impacto del *Trichoderma* en suelos cultivables, además, se introdujo en una sustancia líquida para acelerar el proceso de descomposición y, al mismo tiempo, provocar un efecto en el estado fitosanitario de las plantas. Tomando en cuenta que el hábitat del hongo es el suelo, la madera y lugares húmedos, realizaron orificios en los cuales se colocaron trampas de arroz cocido para el hongo. Luego de dos semanas se observó el arroz con el color específico del hongo (verde). Además, se analizó el beneficio de protección contra hongos parasitarios que produjo el *Trichoderma* en el cultivo de lechuga.

Rodríguez et al., (2022) en un estudio en la universidad de Costa Rica, utilizaron cepas nativas de la especie *Trichoderma*, y se estimuló el crecimiento vegetal de las plantas de tomate, con mayor acumulación de biomasa, un incremento significativo en las variables altura de la planta, longitud de la raíz y número de hojas, tanto en condiciones de invernadero como de campo.

La versatilidad de crecimiento y las bondades que presentan las cepas de *Trichoderma* spp. han hecho posible su utilización para la elaboración de productos biocontroladores fitopatógenos. El sustrato de maíz se considera apto para el desarrollo del hongo, debido a un favorable resultado en su crecimiento.

Luego de 45 días de la aplicación del inoculo con el sustrato se observó una importante colonización del hongo en el suelo (Albrecht et al., 2023).

López et al., (2023) en un trabajo realizado con sustratos de arroz (testigo), maíz, olote de maíz, copra de coco y melaza, con 5 cepas de hongos mediante fermentación sólida y bifásica, obtuvieron que con olote de maíz se produjo concentraciones de esporas muy cercanos a los obtenidos con el arroz, la adición de melaza a los sustratos, produjo un ligero aumento en la concentración de esporas en comparación a los obtenidos sin melaza. En el estudio el olote de maíz resultó el mejor sustrato para la reproducción masiva del hongo *Trichoderma*.

Sánchez et al., (2024) utilizaron *Trichoderma* en el manejo ecológico de la roya del café. Este hongo antagonista, al desplegar diversas estrategias como la competencia, antibiosis y micoparasitismo, mostró ser una alternativa valiosa con efectos sinérgicos destacados en condiciones de campo.

En el establecimiento del nuevo modelo agrícola en Cuba, una de las tareas más urgentes es encontrar vías para reducir el uso de plaguicidas sintéticos para el manejo de plagas. Una de estas vías es el control biológico, que, además de reducir el impacto ambiental en la actividad agropecuaria, permite asegurar la sostenibilidad agrícola. Entre estos métodos, se encuentra la utilización de *Trichoderma* como fungicida, por su actividad antagónica frente a fitopatógenos (Antomarchi et al., 2023).

Teniendo en cuenta lo analizado en el presente trabajo, se propone como objetivo: evaluar del efecto de diferentes dosis de maíz, combinado con otros sustratos en la reproducción del hongo *Trichoderma* spp. en condiciones de laboratorio. Para lo cual se establecieron como objetivos específicos:

1. Determinar el efecto de diferentes dosis de maíz, combinado con otros sustratos en la reproducción del hongo *Trichoderma* spp.
2. Recomendar las combinaciones de mejor efecto para la reproducción del hongo *Trichoderma* spp. en los Centro de Reproducción de Entomófagos y Entomopatógenos de Holguín, Cuba.

MATERIALS AND METHODS

El presente trabajo se desarrolló en el Centro de Reproducción de Entomófagos y Entomopatógenos (CREE) de la Empresa Integral de Holguín, Cuba, con la finalidad de evaluar el efecto de diferentes dosis de maíz, combinado con otros sustratos en la reproducción del hongo *Trichoderma* spp. en condiciones de laboratorio.

Los análisis de calidad se efectuaron en el Laboratorio Provincial de Sanidad Vegetal, ubicado en la misma Ciudad de Holguín. Se utilizaron los Procedimientos Normativos Operacionales para la reproducción y uso de controladores biológicos propuestos por el Instituto Nacional de Investigación

de Sanidad Vegetal (INISAV) y el manual sobre las formas de obtención de controladores biológicos microbianos para su uso en el sistema de producción agrícola.

El ensayo se realizó en cuartos climatizados para la regulación de las condiciones experimentales. Los equipos, materiales y reactivos utilizados fueron: split, autoclave, microscopio, deshumificadores, selladora de bolsas, molino de granos, lámparas de luz ultravioleta, envases de vidrio, bandejas, tarrinas, mecheros, papel indicador de ph, permanganato de potasio, formol y alcohol.

Las alternativas experimentales estuvieron conformadas por cuatro dosificaciones de maíz en diferentes sustratos: bagazo de caña fino, aserrín de pino, cáscara de maní y cáscara de arroz. Se utilizó como testigo el maíz al 100 %. Las alternativas fueron evaluadas en tres repeticiones. En la preparación de los inóculos, se empleó un tubo de cepa con una concentración de 10^9 esp/ml, con una viabilidad de más del 90% según el certificado de calidad, las esporas se disolvieron en 800 ml de agua destilada estéril para ser usado en la inoculación de las diferentes alternativas.

Tabla 1: Alternativas experimentales

Sustratos (g)	Testigo 1000g	Maíz Maíz 700g	Alternativa 1 Maíz 500g	Alternativa 2 Maíz 300g	Alternativa 3 Maíz 300g
Bagazo de caña fino	-	300	500	700	
Aserrín de pino	-	300	500	700	
Cáscara de maní	-	300	500	700	
Cáscara de arroz	-	300	500	700	
Inóculo (<i>Trichoderma</i>)	80ml 1×10^9 esp/ml				
Temperatura (°C)	Regulada de 25 - 30 °C				

Principales aportes de los sustratos que se emplean en las alternativas experimentales:

1. Maíz: 87% de fibra cruda, 23 % de celulosa, 67 % de hemicelulosa y 0.1% de lignina.
2. Cáscara de maní: 6,9% de proteína, 94,9% de fibra total, 54.6 % de celulosa, 14.5 % de hemicelulosa y 30.9 % de lignina.
3. Bagazo de caña: 38.4 % de celulosa, 23.2% de hemicelulosa y 25 % de lignina.
4. Aserrín de pino: 37.7% de celulosa, 11.6% de hemicelulosa y 27.5% de lignina.
5. Cáscara de arroz: 40% de celulosa, 20% de hemicelulosa y 25 % de lignina.

Procedimientos utilizados:

1. Preparación del sustrato, inoculación e incubación: el maíz, las cáscaras de maní y las cáscaras del arroz, fueron molinadas fino y el bagazo de caña y el aserrín pasados por jibe para eliminar las partes

gruesas. Atendiendo a cada alternativa, se realizaron las mezclas de las mismas en el cuarto de calor. Se depositaron 5 kg de los sustratos en canastas con orificios abiertos para facilitar la penetración del vapor a todo el material. Luego se colocaron en la autoclave para su esterilización durante 40 minutos a 121 °C. Al sacarlas los orificios fueron cerrados para impedir la entrada de contaminaciones en el proceso de enfriamiento.

Se dejaron en reposo por 24 horas para su enfriamiento en el cuarto de inoculación, se utilizó previamente luz ultravioleta para eliminar posibles contaminantes. El cuarto de inoculación se esterilizó con el uso de permanganato de potasio y formol. Se puso la lámpara de luz ultravioleta por 40 minutos y se desinfectó las mesetas y envases de vidrios con alcohol al 70%.

Transcurrido el proceso de enfriamiento las tamboras son trasladadas al cuarto de inoculación y con la utilización de mecheros de alcohol, los 5kg de sustratos son inoculados con la suspensión de esporas antes descrita, se procedió a mezclar para lograr homogeneidad y se depositaron 300 gramos por bandejas, las que fueron llevadas al cuarto de crecimiento por un periodo de 5 días a temperatura entre 25 y 30 °C, esta temperatura es óptima para el desarrollo del hongo, la humedad relativa se mantuvo en el rango de 77 al 80 %. Se estableció un régimen de oscuridad controlada para favorecer el proceso de crecimiento y esporulación.

Las bandejas fueron tapadas con otras bandejas durante los tres primeros días para evitar la contaminación y mantener la humedad interna del producto para el desarrollo del micelio, transcurrido ese tiempo fueron destapadas y removidas para brindar oxigenación a los hongos y facilitar su desarrollo según lo planteado por Chávez, et al., (2008) y Aceves, et al., (2008).

2. Secado

Este proceso se realizó en bandejas plásticas de baja altura, buscando la mayor exposición del producto a temperaturas entre 15 y 20 °C y humedad relativa por debajo del 60 %. Se utilizó el deshumificador durante el tiempo de secado que fue de unas 48 horas.

3. Recobrado y conservación del producto terminado.

Se tomaron las muestras del producto terminado y se enviaron al Laboratorio Provincial de Sanidad Vegetal para el control de calidad donde se utilizó el manual del Instituto Nacional de Investigaciones de Sanidad Vegetal sobre Normas de Calidad de biopreparados. En base a ello, se elaboró el certificado de concordancia que incluyó: pureza microbiológica, concentración y viabilidad. Se procedió a envasar el producto terminado en bolsas de polipropileno que fueron selladas al calor herméticamente con el empleo de la selladora

Los resultados se evaluaron a través del paquete estadístico Infostat, (Di Rienzo et al., 2017) mediante un análisis de varianza y se aplicó la prueba de comparación de rangos múltiples de medias con el método Tukey para un nivel de significación del 95%.

RESULTADOS

El comportamiento de la temperatura y la humedad relativa en rangos de 24-25 °C y 77- 80% respectivamente, se mantuvieron en los parámetros permisibles para la reproducción de *Trichoderma* spp. Ello fue posible con el empleo de cuartos climatizados y el uso de las bandejas de aguas para el control de la humedad relativa.

Tabla 2: Valores de temperatura y humedad relativa durante el ensayo

FECHA	8:00 AM		12:00 PM		3:00 PM	
	TEMP. °C	H.R. %	TEMP. °C	H.R. %	TEMP. °C	H.R. %
18/6/2025	25.0	79	25.0	77	25.0	79
19/6/2025	24.0	78	25.0	78	25.0	77
20/6/2025	24.4	79	24.3	78	25.0	78
21/6/2025	24.0	78	24.3	77	25.0	80
24/6/2025	24.3	80	25.0	78	25.0	78
25/6/2025	24.3	79	24.7	80	24.5	78
26/6/2025	24.5	80	25.2	79	25.0	79
27/6/2025	25.1	79	25.0	80	25.0	80
1/7/2025	25.2	78	25.0	79	25.0	79
2/7/2025	25.0	80	25.0	79	25.3	78
3/7/2025	25.0	79	25.2	80	25.2	80
4/7/2025	25.2	79	-	-	-	-

Resultados en las alternativas estudiadas

Se utilizó como testigo el maíz molido fino sin mezclar (100% puro). En la evaluación de este sustrato se obtuvo valores de esporulación entre 3.1 y 3.9 x10⁹ esp/ml.

Tabla 3. Respuesta en maíz fino (100 %)

Testigo	Sustrato	Maíz (1000g)		
		Réplica I (esp/ml)	Réplica II (esp/ml)	Réplica III (esp/ml)
	Maíz fino	3.6 x10 ⁹	3.9 x10 ⁹	3.1x10 ⁹

Estos resultados se corresponden con los que se obtienen con el uso de la cabecilla de arroz, el cual es el sustrato que de manera tradicional se emplea en la reproducción de *Trichoderma* spp., por lo que se pudo validar la utilización del maíz fino para efectuar los ensayos en las diferentes alternativas. La primera alternativa correspondió a la combinación de 700g de maíz fino con 300g de cada uno de los sustratos, es decir, el maíz fino en un 70% y los sustratos en un 30%. Los resultados se muestran en la tabla siguiente:

Tabla 4. Respuesta en la combinación de 700g de maíz fino con 300g del sustrato

Alternativa	Sustrato (300 g)	Maíz fino (700g)		
		Réplica I (esp/ml)	Réplica II (esp/ml)	Réplica III (esp/ml)
1	Bagazo de caña fino	3.8 x10 ⁹	3.6 x10 ⁹	3.4(x10 ⁹
	Aserrín de pino	2.6 x10 ⁹	1.5 x10 ⁹	2.4 x10 ⁹
	Cáscara de maní	2.5 x 10 ⁹	2.9 x 10 ⁹	2.3 x 10 ⁹
	Cáscara de arroz	5.2 x10 ⁸	4.8 x10 ⁸	5.0 x10 ⁸

En la alternativa evaluada, a excepción de la combinación del maíz fino con cáscara de arroz, que obtuvo valores entre 4.8 x10⁸ y 5.2 x10⁸esp/ml, las demás combinaciones lograron entre 1.5 x10⁹ y 3.8 x10⁹esp/ml. Estos valores están en los rangos permisibles de reproducción del hongo, con esporulación de 10⁹esp/ml.

El mejor resultado en las tres repeticiones correspondió a la combinación del maíz con el bagazo de caña fino, la cual obtuvo valores iguales y superiores a los del testigo (maíz fino en un 100%), entre 3.4 x10⁹ y 3.8 x10⁹esp/ml, con un buen nivel de esporulación, según lo establecido en la metodología de reproducción de *Trichoderma* spp., es decir, en esta combinación se obtiene un buen crecimiento del hongo, seguida por la combinación del maíz con el aserrín de pino y por la cáscara del maní respectivamente.

Tabla 5. Respuesta en la combinación de 500g de maíz fino con 500g del sustrato

Alternativa	Sustrato (500 g)	Maíz fino (500g)		
		Réplica I (esp/ml)	Réplica II (esp/ml)	Réplica III (esp/ml)
2	Bagazo de caña fino	1.9 x10 ⁹	1.5 x10 ⁹	2.0 x10 ⁹
	Aserrín de pino	2.6 x10 ⁹	2.9 x10 ⁹	2.4 x10 ⁹
	Cáscara de maní	1.9 x10 ⁹	2.0 x10 ⁹	1.9 x10 ⁹
	Cáscara de arroz	3.9 x10 ⁷	3.7 x10 ⁷	3.9 x10 ⁷

Como muestra la tabla 5, en tres de las combinaciones de maíz fino, en dosis de 50% con el 50% de los sustratos, es decir, 500g en cada caso, se obtienen valores de 10^9 esp/ml (maíz fino con bagazo de caña fino, con el aserrín de pino y con la cáscara de maní). Estos valores son adecuados según lo establecido para este hongo antagonista en condiciones de reproducción controladas. El análisis de los resultados revela que, a pesar, de que en los CREE de manera tradicional para la reproducción de este hongo antagonista se emplea como sustrato la cáscara de arroz, en este ensayo se obtienen bajas concentraciones de esporas, por lo que se evidencia que la combinación de maíz fino con este sustrato no fue efectiva.

Tabla 6. Respuesta en la combinación de 300g de maíz fino con 700g de sustrato

Alternativa	Sustrato (700 g)	Maíz fino (300g)		
		Réplica I (esp/ml)	Réplica II (esp/ml)	Réplica III (esp/ml)
3	Bagazo de caña fino	1.5×10^9	1.8×10^9	1.5×10^9
	Aserrín de pino	1.5×10^9	1.3×10^9	1.3×10^9
	Cáscara de maní	1.5×10^9	1.8×10^9	1.6×10^9
	Cáscara de arroz	2.5×10^7	2.5×10^7	2.6×10^7

Con respecto a la tercera alternativa, se utilizó 300g de maíz fino combinado con 700 g de cada sustrato, es decir, el maíz fino al 30% y el sustrato al 70%. Al analizar los resultados que se presentan en la tabla 6, se puede apreciar que, en las tres primeras combinaciones del maíz con bagazo de caña fino, con aserrín de pino y con cáscara de maní se obtienen concentraciones similares, las cuales están entre 1.3×10^9 y 1.8×10^9 esp/ml.

Estos valores de esporulación del hongo en condiciones de laboratorio están en los parámetros establecidos, por lo que se puede plantear que estas combinaciones son adecuadas y reducen considerablemente el uso de maíz como sustrato (30%), el cual constituye un renglón que presenta un elevado costo en el mercado nacional, por lo que se genera un impacto económico en el proceso de producción de *Trichoderma* spp. para su uso con fines agrícolas.

Los valores más bajos se obtienen en la combinación de maíz con cáscara de arroz, la que mostró valores de esporulación de 10^7 esp/ml, concentración que se encuentra por debajo de las establecidas para su utilización. Los valores en esta combinación, resultaron más bajos que en las alternativas 1 y 2.

Análisis de varianza de clasificación simple (ANOVA):

Teniendo en cuenta los resultados antes expuestos, se procedió a efectuar un análisis de varianza de clasificación simple (ANOVA), utilizando el paquete estadístico Infostat (Di Rienzo *et al.*, 2017).

Tabla 7. Análisis de varianza de clasificación simple (ANOVA)

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	G.L	Cuadrado medio	F	P
Combinaciones	4.00222222	2	2.00111111	19.1595745	0.008934004
Réplica	0.16888889	2	0.08444444	0.80851064	0.507116621
Error	0.41777778	4	0.10444444		

El mismo aportó que existe variabilidad entre las combinaciones evaluadas, por lo que se procedió a realizar el análisis de significancia de las diferencias entre las medias a través de pruebas de rangos múltiples de Tukey al 95% de confianza.

Tabla 8. Prueba de comparación de rangos múltiples de Tukey al 95% de confianza

	Combinaciones	Medias (esp/ml)
Alternativa 1	700g maíz fino - 300g bagazo de caña fino	3.6 x10 ⁹ a
Alternativa 1	700g maíz fino - 300g cáscara de maní	2.7 x10 ⁹ b
Alternativa 2	500g maíz fino - 500g aserrín de pino	2.6 x10 ⁹ b

Letras diferentes difieren según Tukey ($p < 0,05$). Valores representados por las medias \pm error estándar (EE) = 0,417 de tres repeticiones. CV (%) = 11,54

Como se aprecia en la tabla 8, la combinación de 700g de maíz fino con 300g de bagazo de caña fino, con los valores de concentración más altos para una media de 3.6 x10⁹ esp/ml, mostró diferencias significativas con las demás combinaciones analizadas, es decir, 700g maíz fino con 300g de cáscara de maní y 500g de maíz fino con 500g de aserrín de pino, las cuales no mostraron diferencias entre ellas.

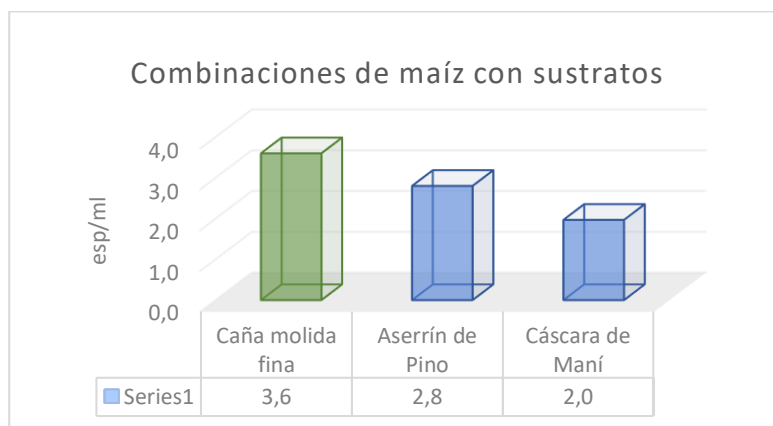


Figura 1. Combinaciones de mejor efecto sobre la reproducción de *Trichoderma* spp.

El análisis mostró que la alternativa 1, es la de mejor efecto sobre la reproducción de *Trichoderma* spp, con dos combinaciones que expresaron valores superiores a las demás en estudio. A esto se agrega que, el mejor efecto correspondió a la combinación de 700g de maíz fino con 300g de bagazo de caña fino.

DISCUSIÓN

En las combinaciones de maíz fino con los sustratos: bagazo de caña fino, aserrín de pino y cáscara de maní, se alcanza un comportamiento favorable en las tres alternativas estudiadas, debido a que en todos los casos los valores estuvieron en el rango de 10^9 esp/ml.

Asimismo, se obtuvo el valor más alto en la combinación de 700g de maíz fino con 300g de bagazo de caña fino, con valores de 3.8×10^9 , 3.6×10^9 y 3.4×10^9 esp/ml. Los valores más bajos en las tres alternativas estudiadas, lo obtuvo la combinación de maíz fino con cáscara de arroz. Resultados que concuerdan con los presentados por Agamez et al., (2008) durante la evaluación de 13 sustratos, siendo la cáscara de arroz la que mostró los valores más bajos de concentración durante la reproducción de *Trichoderma* spp.

Se evidenció además que, entre mayor dosis de maíz fino, mejor es el efecto en la reproducción del hongo, pues aumenta la concentración de esporas. Sin embargo, es significativo destacar que con la dosis de un 30% de maíz, independientemente que disminuyen las concentraciones de spora con respecto a la alternativa 1 y 2 en las combinaciones con bagazo de caña fino, aserrín de pino y cáscara de maní, los valores están en el rango de 10^9 esp/ml, por lo que esta alternativa constituye una opción para reducir los gastos por concepto de compra de sustratos, debido a que los valores de esporulación son permisibles para la reproducción de este hongo antagonista.

Estos resultados se corresponden con los alcanzados por Endara (2011), donde el bagazo de caña incidió en un mejor desarrollo de *Trichoderma* spp., con un mayor porcentaje de rendimiento. Asimismo, coinciden con los reportados por Allori et al., (2017) que obtuvieron los mejores resultados al utilizar el bagazo de caña enriquecido con melaza al 10%.

El bagazo de caña es un sustrato que presenta un elevado contenido de nutrientes, contiene un 38.4 % de celulosa y 23.2% de hemicelulosa, lo que posibilita que *Trichoderma* spp. se desarrolle en condiciones adecuadas y exprese una mayor eficiencia en la producción de esporas. Asimismo, es un subproducto de la agroindustria azucarera, por lo que existe alta disponibilidad en Cuba y en otras

regiones del mundo. Por tanto, su uso contribuye a minimizar los costos, lo cual genera un impacto económico en el proceso de reproducción de microorganismos beneficiosos.

Con las alternativas evaluadas se alcanza un notable valor ambiental, dado a que el incremento sostenido de los niveles de producción de *Trichoderma* spp. a partir del uso de sustratos de fácil obtención y económicos, permitirá a los productores agropecuarios disponer de este agente de control biológico, y con ello disminuir el empleo de plaguicidas químicos, cada vez más costosos y contaminantes del medio ambiente.

CONCLUSIONES

El mejor efecto en la reproducción de *Trichoderma* spp se obtiene con la utilización del maíz fino combinado con el bagazo de caña fino, con valor medio de concentración de 3.6×10^9 esp/ml.

Las combinaciones de maíz fino molido con los sustratos aserrín de pino y cáscara de maní en las tres alternativas estudiadas, presentaron valores de concentración de 10^9 esp/ml, los cuales están en el rango permisible de reproducción del *Trichoderma* spp.

El empleo de la combinación de maíz fino en un 30 % (300g) con 70% de los sustratos (700g) de bagazo de caña fino, cáscara de maní y aserrín de pino, constituye la alternativa ecológica con elevado valor económico para su generalización.

Contribuciones de los autores: Conceptualización: MVDP y MGM; metodología: MVDP y JLGP; instrumento: MVDP y MGM; validación: MVDP, MGM y JLGP y; análisis formal: MVDP; investigación: MVDP, MGM y JLGP; Depuración de datos: MVDP y JLGP; redacción-preparación del borrador original: MVDP; revisión y edición, MVDP y MGM; visualización: MGM; supervisión: JLGP; administración del proyecto: MVDP; adquisición de fondos: JLGP. Todos los autores han leído y aceptado la publicación de este manuscrito..

Financiamiento: Este manuscrito no recibió financiamiento externo.

Agradecimientos: Al Ministerio de la Agricultura (MINAG), a la Estación Territorial de Protección de Plantas, al Centro de Reproducción de Entomófagos y Entomopatógenos (CREE), al Laboratorio Provincial de Sanidad Vegetal y a la Universidad de Holguín (UHo) por el financiamiento y apoyo en la ejecución de este proyecto de investigación.

Conflictos e intereses: Los autores declaran no tener conflicto de intereses

REFERENCIAS

1. Aceves, A. C.; Otero, M.A.; Martínez, R.D.; Rodríguez, N.I.; Aiza, R.; y Barrios A. Producción masiva de *Trichoderma harzianum* Rifai en diferentes sustratos orgánicos. *Revista Chapingo Ser.Hortic.* 2008, 14 (2), 185-191. Chapingo.horticultura@gmail.com
2. Agamez, E.; Zapata, E. Y.; Oviedo, L.E.; y Barrera, J.L.). Evaluación de sustratos y procesos de fermentación sólida para la producción de esporas de *Trichoderma sp.* *Revista Colombiana de Biotecnología.* 2008, 10 (2), 23-24. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=77610204>
3. Allori, E.; Yasem M.G.; y Ploper L.D. (). Evaluación de sustratos para la producción de esporas de *Trichoderma* y estudio del crecimiento en arroz de las cepas antagonistas TPT03, TPT02, MRT35 Y MRT40. *Revista Agronómica del Noroeste Argentino.* 2017, 37 (1), 57-66. https://archive.org/details/pub_revista-agronomica-del-noreste-argentino
4. Albrecht, A. B.; Albrech, M. L.; Morínigo, K. B.; Zapata, N. J.; y Rebruk, R. Producción artesanal de *Trichoderma spp.* para posible uso en el control biológico sostenible en huertas. *Revista sobre estudios e investigaciones del saber académico.* 2023, 17 (17). <http://publicaciones.uni.edu.py/index.php/rseisa>
5. Antomarchi, Y.; Tamayo, E.; Guerra, J. L.; y Mas Dieg S. M. Producción de hongo *Trichoderma harzianum* A-34 en sustratos sólidos alternativos. *Revista Científica Arbitrada Multidisciplinaria PENTACIENCIAS.* 2023, 5(1), 259-267. <https://editorialalema.org>
6. Arévalo, E.; Cayotopa, J.; Olivera, D., Gárate, M.; Trigos, E., Costa, B.; y Leon B. Optimización de sustratos para la producción de conidias de *Trichoderma harzianum* por fermentación sólida en la Región de San Martín, Perú. *Revista Investigaciones Altoandina.* 2017, 19 (2), 135-144. <https://huajsapata.unap.edu.pe>
7. [Borja, L.](#); [Rocano J. P.](#); [Bustamante, K. M.](#) Captura, reproducción y aplicación del hongo *Trichoderma*. *Revista Juventud y Ciencia Solidaria.* 2020, <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/23899>
8. Companioni, B.; Domínguez, G.; y García.; R. *Trichoderma*: su potencial en el desarrollo sostenible de la agricultura. *Biotecnología Vegetal.* 2019, 19 (4), 237-248. <https://revista.ibp.co.cu/index.php/BV>
9. Chávez, M.; Salvador, J.; Martínez, M. M.; Mercado, M.; Rodríguez, M. X.; y Quevedo, B. Efecto del sustrato y la exposición a la luz en la producción de una cepa de *Trichoderma spp.* *Universitas Scientiarum.* 2008, 3 (3), 245-251. www.javeriana.edu.co/universitas_scientiarum
10. Cubilla, A.; Ruiz, D.; Romero, M.; Flores, M.; y Barúa, J. Antibiosis de proteínas y metabolitos en especies de *Trichoderma* contra aislamientos paraguayos de *Macrophomina*

- phaseolina*. *Agronomía Mesoamericana*. 2019, 30(1), 63-77.
<https://doi.org/10.15517/am.v30i1.34423>
11. Di Rienzo, J. A.; Casanoves F.; Balzarini, M. G.; González, L.; Tablada, M.; y Robledo, W. InfoStat versión 2017. Grupo InfoStat, FCA Universidad Nacional de Córdoba.
<https://www.academia.edu>
12. Druzhinina, I.; Kopchinskiy, A.; y Kubicek, C. The first 100 *Trichoderma* species characterized by molecular data. *Mycoscience*. 2006, 47, 55-64.
<https://www.sciencedirect.com>
13. Endara, M. A. Reproducción del Hongo *Trichoderma Harzianum* (biofungicida) aprovechando desechos agroindustriales (residuos de papa, tamo de fréjol, bagazo de caña) [Tesis de pregrado, Universidad Técnica del Norte]. 2011.
<https://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/387>
14. Hernández, D. J.; Ferrera-Cerrato R.; y. Alarcón A. *Trichoderma*: Importancia agrícola, biotecnológica, y sistemas de fermentación para producir biomasa y enzimas de interés industrial. *Chilean J. Agric. Anim. Sci. Ex Agro-Ciencia* (2019) 35(1), 98.
<https://www.chileanjar.cl>
15. López, T.; Paramo, L. A.; y Delgado, H. D. Reproducción masiva de hongos *Trichoderma* previamente identificados de suelos Nicaragüenses en diferentes sustratos orgánicos. *Revista científica NEXO*. 2023, 35 (3). <https://revistas.uni.edu.ni/index.php/Nexo/index>
16. Rodríguez, D.; y Vargas, J. Efecto de la inoculación con *Trichoderma* sobre el crecimiento vegetativo del tomate (*Solanum Lycopersicum*). *Agronomía Costarricense*. 2022, 46 (2).
<https://dx.doi.org/10.155517/rac.v46i2.52045>
17. Sánchez, R.; González, E.; Padilla, J. S.; Gallegos, M. A.; González, U.; Gómez, R.; y De Lira, K. V. Efectividad de cepas de *Trichoderma* spp., y *Lecanicillium* spp., en el control de la roya (*Hemileia vastatrix* Berkeley & Broome) en el cultivo del café en Nayarit, México. *Revista de Ciencias Biológicas y de la Salud*. 2024, 26 (1). <https://biotecnia.unison.mx>
18. Torres, M.; Ortiz, C.; Bautista, C., Ramírez, J.; Ávalos, N.; Cappello, S.; y De la Cruz, A. Diversidad de *Trichoderma* en el agroecosistema cacao del estado de Tabasco, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*. 2015,86(4): 947-961. <https://revista.ib.unam.mx>

Recibido: [18 diciembre 2025] | Aceptado: [24 enero 2026] | Publicado: [15 marzo 2026] |

Citation: Daley, M. V.; Escobar, R.; García, M.; García J. L. Alternativas para la reproducción del *Trichoderma* spp. en condiciones de laboratorio. *Bionatura*. 2026. Volumen 11, No 1.
<https://doi.org/10.70373/RB/2026.11.01.9>

Peer review information: Bionatura thanks the anonymous reviewers for their contribution to the peer review of this work using <https://reviewerlocator.webofscience.com/>

All articles published by Bionatura Journal are freely and permanently accessible online immediately after publication, without subscription charges or registration barriers.

Publisher's Note: Bionatura stays neutral concerning jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



QUINA (*Cinchona officinalis*)

Full Spectrum Extract

Principio activo: Quinina, quinidina, cinconina y cinconidina.

Antipalúdico: Contra la malaria (paludismo), contra el parásito Plasmodium.

Antipirético y analgésico: Para reducir la fiebre y aliviar el dolor.

Tónico y digestivo: Estimula el apetito y la digestión.

Antibacteriano y antifúngico: Contra bacterias y hongos.

Calambres musculares: Alivia calambres, especialmente en las piernas y para tratar la babesiosis (enfermedad transmitida por garrapatas).

Bebidas: Preparar el cóctel **Gin Tonic** y el agua tónica.

Uso externo: En infusiones para lavar heridas y úlceras.

NOT. SAN. 26001-ALN-0620.

CONTACTO: Dr. Julio Pineda Insuasti, PhD

info.biodiversity@gmail.com, Cel. +593 99 758 9267. Ibarra-Ecuador

SCIENTIFIC PARTNER: <https://cebaecuador.org/>

inf.ceba@gmail.com, Cel + 593 99 579 7813. Ibarra-Ecuador.



Estudio de la variabilidad espacial de la resistencia de penetración en un vertisol pélico de la cuenca del río Cauto

Study of the spatial variability of penetration resistance in a pelico vertisol of the Cauto river basin

Ramón Candelario Núñez Tablada^{1*}, Vilma Anastasia López Cruz², Adolfo Alvarez Rodríguez³

¹Universidad de Holguín / Cuba / Holguín; rcnunez1958@gmail.com <https://orcid.org/00090001-2496-4627>

²Universidad de Holguín / Cuba / Holguín; <https://orcid.org/0009-0004-3126-4305>

³Universidad de Holguín / Cuba / Holguín; adolfoalvarezrod@gmail.com. <https://orcid.org/0009-0002-5989-2931>

<https://doi.org/10.70373/RB/2026.11.01.10>

Resumen

La investigación se realizó en la cuenca del río Cauto provincia Holguín, durante el periodo de marzo/agosto del 2024 en un *Vertisol pélico* con el objetivo de determinar la variabilidad espacial de la Resistencia de penetración del suelo en tres áreas, una sembrada de *Sacharum officinarum* (Caña de azúcar), otra dedicada al pastoreo intensivo y la tercera sembrada de *Musa paradisiaca* (plátano). Se seleccionó una hectárea por área, utilizando el Diseño de Muestreo Aleatorio Sistemático o en rejilla de celdas cuadradas de 20 m² con 16 puntos de muestreo por hectárea en el punto medio de cada celda, las muestras se extrajeron cada 10 cm hasta los 50 cm de profundidad, en cada punto se tomaron cinco muestras de suelo 90 por hectárea y 180 total; utilizándose la barrena de Simpsons¹⁰. Para determinar la Resistencia de penetración del suelo se utilizó el penetrómetro de impacto¹². Según la cantidad de impactos por profundidad se clasificó el grado de compactación. Entre los resultados alcanzados se resaltan que tanto en el área de caña de azúcar como del cultivo del plátano existió una alta variabilidad en cuanto a la Resistencia de penetración del suelo.

Palabra clave: caña de azúcar, resistencia de penetración, compactación, penetrómetro de impacto.

Abstrac

The research was conducted in the Cauto river basin, Holguín province, from March to August 2024, in a Pélico Vertisol. The objective was to determine the spatial variability of soil penetration resistance in three areas: one planted with *Saccharum officinarum* (sugarcane), another dedicated to intensive grazing, and the third planted with *Musa paradisiaca* (banana). One hectare was selected per area, using a Systematic Random Sampling Design (SRS) or a grid of 20 m² square cells with 16

sampling points per hectare at the midpoint of each cell. Samples were extracted every 10 cm to a depth of 50 cm. At each point, five soil samples were taken (90 per hectare and 180 total). A Simpson auger was used.¹⁰ Soil penetration resistance was determined using an impact penetrometer.¹² The degree of compaction was classified according to the number of impacts per depth. Among the results obtained, it is noteworthy that both the sugarcane and banana plantations exhibited high variability in soil penetration resistance.

Keywords: Sugarcane, penetration resistance, compaction, impact penetrometer.

Introducción

La resistencia de penetración del suelo es uno de los problemas que más afectan las áreas dedicadas a la agricultura en Cuba y este fenómeno se ha hecho extensivo a todas las provincias de territorio nacional en menor o mayor grado, su campo no ha sido totalmente explorado y existen grandes tendencias a continuar sus estudios en cada una de las localidades afectadas debido a su variable comportamiento. Los Vertisoles de la cuenca del río Cauto pertenecientes a la provincia de Holguín, han sido explotados por más de 40 años por el monocultivo de la caña de azúcar, lo que ha influido en gran medida a su degradación, debido a la aplicación de diferentes tecnologías empleadas de forma irracional, como tecnologías de preparación de suelo, donde la maquinaria ha jugado un papel fundamental en los procesos de compactación, lo que ha provocado que más del 84 % de los suelos dedicados a la agricultura presenten algún tipo de compactación, afectando los rendimientos de los cultivos en las áreas productivas de la provincia. Teniendo en cuenta los problemas presentados en los suelos de la provincia la investigación tiene como objetivo el estudio de tres áreas agrícolas en la cuenca de río Cauto para determinar la variabilidad de la Resistencia de penetración a diferentes profundidades.

Materiales and Métodos

La investigación se realizó en la cuenca del río Cauto provincia Holguín, durante el periodo de marzo/agosto del 2024 en un *Vertisol pélico*. Para el desarrollo de las investigaciones se seleccionaron tres áreas, de manera que su ubicación geografía fuera representativa. Cada área cuenta con la extensión de una hectárea, las mismas presentan características similares, estas fueron explotadas por el monocultivo de la caña de azúcar por más de cuatro décadas.

Área 1. Cultivada por el monocultivo de caña de azúcar, las cosechas en los últimos 10 años fueron mecanizada, realizándole las labores culturales establecidas después de cada cosecha.

Área 2. Se encontraba en barbecho (reposo) por más de cinco años, en los momentos actuales se

dedica al pastoreo intensivo.

Área 3. Sembrada de caña de azúcar, dejándose en barbecho (reposo) y actualmente sembrada de *Musa paradisiaca* (plátano vianda).

Esta área estuvo explotada por el cultivo de la caña de azúcar por más de cuatro décadas, demoliéndose en el año 2022 al realizarle la última cosecha, se mantuvo en barbecho hasta enero del 2024, año en que se preparó el suelo de forma convencional para la siembra del cultivo plátano vianda.

Diseño de la red de muestreo

La red de muestreo usada en la investigación, se presenta en la figura 1, corresponde al diseño de Muestreo Aleatorio Sistemático o en rejilla de celdas cuadradas (puntos de muestreo en el centro de las celdas) ¹².

●	●	●	●
●	●	●	●
●	●	●	●
●	●	●	●

Figura 1.- Diseño de la red de muestreo.

Toma de muestra

Se formaron 16 cuadrículas de 20 m² por hectárea, para las mediciones se utilizó una cinta métrica de 50 metros de largo, seleccionándose un punto por cada cuadrícula (16 puntos). En cada punto se tomaron cinco muestras de suelos a intervalos de 10 cm hasta la profundidad de 50 cm, para 90 muestras por hectárea y un total de 180 muestras; las mismas se extrajeron utilizando la barrena de 11.

Medición de la resistencia del suelo a la penetración

La variable experimental que se utilizó para evaluar la compactación fue la resistencia a la penetración (RP). La misma se determinó con el penetrómetro de impacto, formado por una asta graduada en centímetro, un cono en la punta de la asta, y un peso de recorrido constante (1 Kg) para provocar su penetración, con principio de medición de profundidad por impacto.

Metodología del penetrómetro de impacto

Para determinar los niveles de compactación del suelo en las diferentes profundidades, se consideró que la resistencia se obtenía en kilogramos fuerza /cm² = (kgf/cm²).

La metodología para la conversión de los (kgf/cm²) en Mega Pascal (MPa), unidad internacional reconocida para determinar la RP del suelo, y, clasificar los niveles de compactación de las áreas

objeto de estudio a las diferentes profundidades establecidas. Para efectuar esta conversión fue necesario utilizar la siguiente expresión matemática: ¹⁵

$$R = \frac{(M + m) \cdot g}{A} + \frac{f \cdot M \cdot g \cdot h}{10 \cdot A} \cdot N$$

Donde:

M: Masa de impacto= 2 Kg

m: Masa del cuerpo del Penetrometro= 2,5 Kg

g: Aceleración de la gravedad= 1cm²/segundos

f: Frecuencia de energía para promover el Penetrómetro

h: Altura de recorrido = 48 cm

N: Número de golpe de la masa de impacto

A: Área de base del Penetrometro de punta fina =1.01 cm²

Esta ecuación puede ser resumida en:

$$R \text{ (kgf/cm}^2\text{)} = 5,6 + 6,89 \cdot N$$

Y finalmente, para transformar kgf.cm⁻² en Mega Pascal (MPa)

Basta utilizar a ecuación siguiente

$$R \text{ (MPa)} = 0,0980665 \times \text{kgf/cm}^2$$

Tabla 1: Metodología de clases de la RP del suelo. (USDA¹⁵)

Clases.	Resistencia de penetración (MPa).
Extremadamente pequeña	< 0,01
Pequeña	< 0,1
Muy baja	0,01 – 0,1
Baja	0,1-1
Intermedia	0,1 - 0,2
Moderada	1 - 2
Grande	> 2
Alta	2 - 4
Muy alta	4 - 8
Extremadamente alta	> 8

Resultados

Variabilidad espacial

1.- Área de caña de azúcar

En los mapas de la **Figura 2** se representa la distribución espacial de la RP en las distintas profundidades muestreadas. Teniendo en cuenta los resultados se observa la heterogeneidad que existe entre los diferentes niveles de compactación en cada una de las profundidades estudiadas, apreciándose en la profundidad de 0 cm -10 cm que existe una alta distribución espacial de las zonas con mayor compactación, esto puede estar influenciado por el efecto de la mecanización, es decir cosecha, las pasadas de los implementos, peso y patinaje de la maquinaria para realizar las diferentes labores de cultivo; estos resultados se corroboran con los obtenidos por Taylor y Gill¹³,

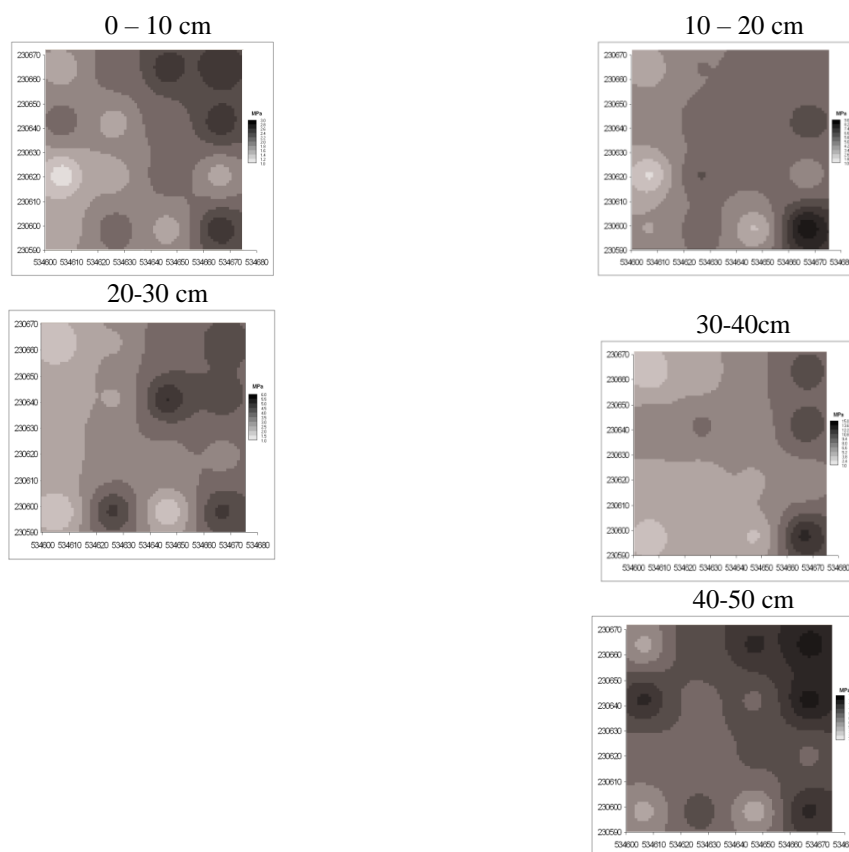


Figura 2.-
Mapas de
de

variabilidad de Rp en el área de caña de azúcar donde plantean que la principal fuente de compactación es el tráfico vehicular, el cual puede causar, de acuerdo con Jorajuría⁶, disminución del espacio poroso, menor capacidad para retener agua y una mayor impedancia para el desarrollo radicular.

Smith y Dickson¹¹, indicaron que la compactación de las capas superficiales está influenciada principalmente por la presión superficial en la zona de contacto rueda-suelo, mientras que la compactación subsuperficial está directamente influenciada por el peso.

Al respecto, Hakansson et al.⁴, determinaron que cargas mayores de 60 KN por eje, u 80 a 100 KN para ejes en tandem, provocarían compactación a profundidades superiores a los 400mm. Sin embargo, la compactación subsuperficial depende no solo del peso del vehículo sino también del número de pases que se efectúe, Jorajuría y Draghi⁷. Gameda et al.³, indicaron que la compactación en los horizontes superficiales de suelos agrícolas estuvo más fuertemente emparentada con el número de pases que con la presión de contacto ejercida.

En las profundidades de 10cm hasta 40cm aparecen mayores zonas espaciadas con diferentes niveles de compactación, aunque no dejan de ser representadas zonas con altos niveles, lo que queda demostrado por las diferentes intensidades de los colores que la representan. A partir de esta profundidad y hasta los 50cm se aprecia un incremento de las zonas de mayor compactación; este resultado puede estar vinculado con lo planteado por Hernández⁵ cuando expresa que los suelos Vertisoles pueden sufrir altos niveles de compactación en las capas superficiales que están influenciadas por factores externos y las capas inferiores pueden sufrir niveles de compactación de forma natural debido a su formación y a los altos niveles de arcillas que poseen. En la representación de la RP en cada gráfica teniendo en cuenta la leyenda se observa que los rangos en que se mueve la resistencia de compactación bajo caña de azúcar oscilan de medianamente resistente a fuertemente resistente (1–10 Mpa), lo que evidencia que las labores de cultivo después del corte mecanizado no fueron adecuadas para realizar una descompactación uniforme.

2-. Área en barbecho

En la **Figura 3** se representa la distribución espacial de la RP en las distintas camadas muestreadas en el suelo en barbecho.

En los mapas se observa la variabilidad que existe en la interpolación espacial de la RP en esta área, predominando los colores menos intensos en los primeros 10cm, intensificándose hasta los 20cm, sin embargo, se nota que comienzan aclararse los colores nuevamente a partir de esta profundidad hasta los 40cm, intensificándose nuevamente hasta los 50 cm.

Si se analizan detenidamente las áreas que reflejan los mayores valores de compactación mantienen una inestabilidad, pasando de colores menos intensos a más intensos y viceversa, no siendo así para las áreas de los colores menos intensos que reflejan una menor compactación donde se van intensificando hasta pasar a colores que representan valores de extrema compactación.

Analizando los registros del área, estos reflejan también el hecho de que ha sido utilizada para el pastoreo libre intensivo de ganado vacuno tres años después de su demolición, Oquendo⁹ en estudios realizados sobre el fomento y explotación de los pastos manifiesta que las áreas dedicadas a esta actividad deben ser divididas en cuarterones, para no provocar un exceso de carga animal y afectar el desarrollo de los pastos, si se maneja esto se puede deducir que, aunque estas áreas no hayan sido explotadas por la mecanización después de demolidas, al ser destinadas a un pastoreo libre intensivo, sin conocer la carga a que está sometida, puede provocar un alto grado de compactación, justificando

que la disminución de la misma a partir de los 25cm está dado a que el peso de los animales no provoca una fuerte compactación a esa profundidad, y si puede estar asociado a la compactación que estos suelos están propensos de forma natural; además la variabilidad puede estar dada, también, por una vegetación que surgió de modo espontáneo y se encuentra distribuida heterogéneamente, provocando que los animales se concentren en las áreas de mejores condiciones para pastar, así como al paso de otros animales y equipos que atraviesan el áreas para su traslado de lugar, todos estos fenómenos pueden haber influido en los altos niveles de variabilidad espacial de la RP.

Al corroborar los resultados alcanzados en las investigaciones con otros autores estudiosos de la temática como Lima⁸, cuando explica que los determinados grados de compactación que presentan los suelos en sus diferentes niveles es debido a que han estado sometidos a determinadas presiones externas, que pueden ser causadas por el paso de las máquinas agrícolas, equipos de transporte o paso de los animales.

Otros autores como Bertoni et al.¹, en investigaciones realizadas sobre esta temática manifiestan que los pastos son buenas coberturas para los suelos, sin embargo un incorrecto manejo de los mismos como: poca o ninguna fertilización, un pastoreo excesivo, provocan un aumento en la densidad del suelo y una reducción de la macroporosidad debido a una pérdida de la capacidad de generación del pasto natural escaseando la cobertura del suelo, culminando en una compactación del suelo por el pisoteo de los animales.

Con los resultados de estas investigaciones queda demostrado el efecto del pastoreo intensivo y el uso de los diferentes implementos agrícolas sobre los diferentes niveles de compactación en el suelo. Por el indiscriminado pastoreo intensivo a que está sometida el área, esto conlleva a que existan diferentes niveles de compactación y una distribución heterogénea en la misma capa muestreada, así como en diferentes profundidades, influyendo de forma directa en el desarrollo de los pastos y a su vez en las diferentes propiedades del suelo, conduciendo en un futuro, que puede ser de mediano a largo plazo, a un deterioro de este agroecosistema no sólo en el desarrollo de pastizales para la alimentación animal, sino, en el establecimiento y desarrollo de cultivos que se precisen establecer para la producción de alimentos, por lo que urge la elaboración de estrategias tecnológicas de forma inmediata para el manejo y conservación de los mismos.

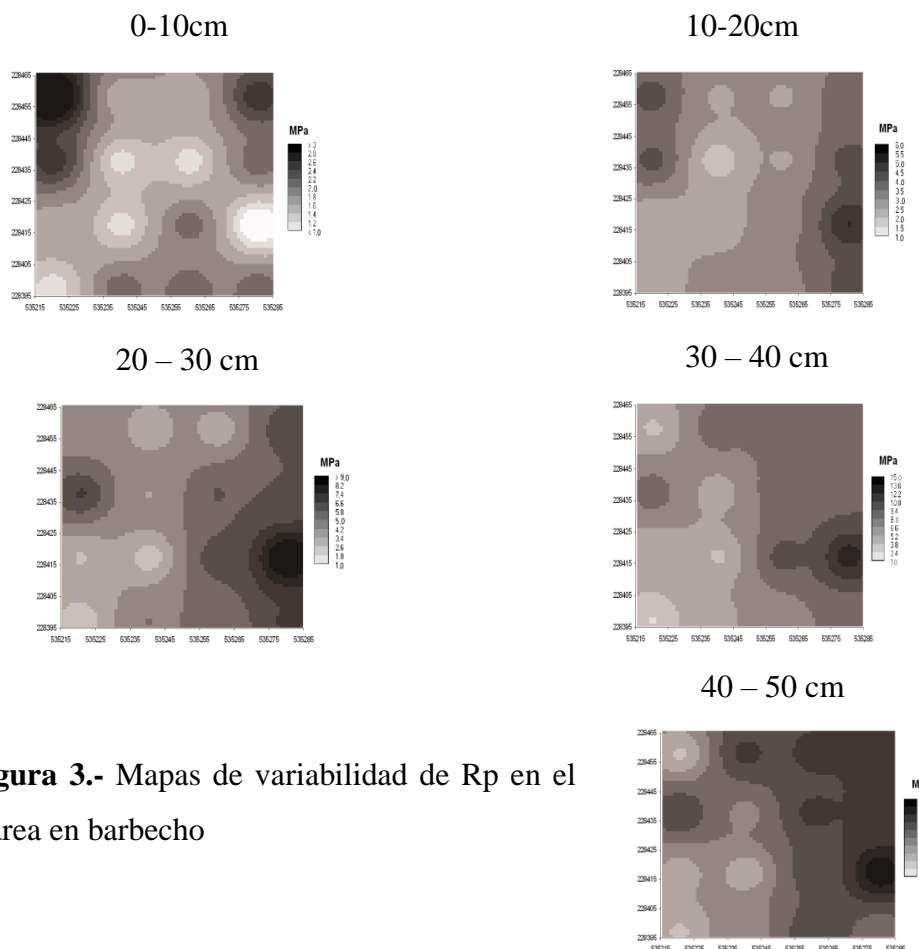


Figura 3.- Mapas de variabilidad de Rp en el área en barbecho

3-. Área de reconversión

En los mapas siguientes (figura 4) se representa la distribución espacial de la RP en las distintas capas muestreadas en el suelo para las parcelas que representan etapa de reconversión. En primer lugar se observa la alta heterogeneidad que existe en las diferentes capas muestreadas en cuanto a los niveles de RP, sin embargo la mayor variabilidad espacial se encuentra entre 0-10cm, ya que la distribución de los colores demuestra que a partir de los 10cm se forman capas más homogéneas hasta los 40cm de profundidad, a partir de donde se incrementa nuevamente la variabilidad espacial, aunque la escala de colores representa que en todas las capas los valores de la RP son altos (2-9 Mpa).

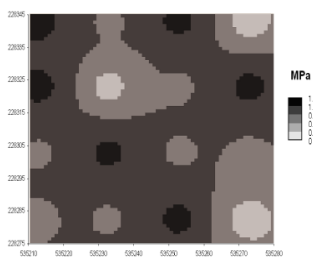
Según Hernández⁵, hay que tener en cuenta que los Vertisoles presentan altos niveles de arcillas (más de un 40%), y que esto permite que se compacten fácilmente, tanto influenciado por fuerzas externas como de forma natural, en las sucesivas fases de humectación-deseccación.

Las representaciones de los mapas, demuestran a simple vista que no ha existido una adecuada preparación del suelo para la siembra del plátano, ya que para el establecimiento de cualquier cultivo

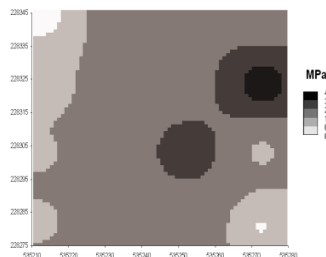
los suelos deben ser descompactados de forma uniforme tanto en el largo y el ancho del área como en las distintas profundidades en las que se realicen las labores, permitiendo que exista una adecuada aireación y percolación del agua para que los elementos nutritivos puedan ser absorbidos por las plantas ⁶.

Thomasson¹², y Erickson², manifiestan que uno de los elementos fundamentales para el desarrollo de los cultivos es la macro y microporosidad que están directamente relacionadas con la difusión de oxígeno en el suelo para las raíces, y que éstas determinan la capacidad de aireación del suelo, por tales motivos la preparación de un suelo debe estar dirigida a realizar una adecuada descompactación. En trabajos realizados por los mismos autores demostraron que valores de porosidad de aireación por debajo del 10-15% son, generalmente considerados como restrictivos para el crecimiento de las plantas y la productividad en la mayoría de los cultivos.

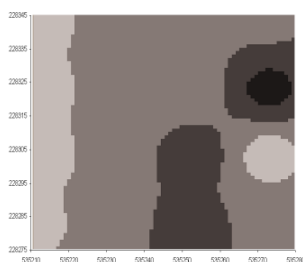
0 – 10 cm



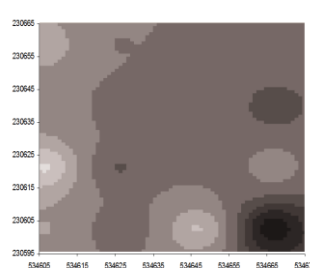
10 – 20 cm



20-30 cm



30-40cm



40-50 cm

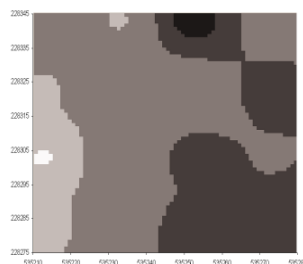


Figura 4.- Mapas de variabilidad de Rp en el área en reconversión

Conclusiones

Existió una alta variabilidad de la compactación en todas las áreas donde se desarrollaron las investigaciones.

En las áreas dedicadas a los cultivos no se cumplió con la disciplina tecnológica, debido a que la preparación del suelo no cumplía con las exigencias de los cultivos.

Referencias

1. BERTONI J, LOMBARDI N. Conservação do solo. São Paulo: Ícone; 1990. 355p.
2. ERICKSON A E. Tillage effects on soil aeration. In: VAN DOREN, D.M. et al. Predicting tillage effects on soil physical properties and processes. Madison: ASA ;1982. 91-104 p.
3. GAMEDA S, RAGHAVAN G S, MC KYES E .et al. Subsoil compaction in a clay soil. I. Cumulative effects. Soil and Tillage Research, Amsterdam. v.10;1987.113-122 p.
4. HAKANSSON I, VOORHEES W R, RILEY H. Vehicle and wheel factors influencing soil compaction and crop response in different traffic regimes. Soil and Tillage Research, Amsterdam. v.11; 1988.239-282 p.
5. HERNÁNDEZ A, PÉREZ J M, BOSCH D. et al. Nueva Versión de la Clasificación Genética de los Suelos de Cuba. Inst. Suelos, AGRINFOR, Ciudad Habana; 1999. 64p.
6. JORAJURÍA D. El tráfico vehicular, la compactación y la sostenibilidad de la producción de madera. In: Actas del Primer Seminario de Actualización en Sistemas de Cosecha y Transporte Forestal, Eldorado; 1996.45-50p.
7. JORAJURÍA D, DRAGHI L. The distribution of soil compaction with depth and the response of a perennial forage crop. Journal of Agricultural Engineering Research , London.v. 66; 1997. p.261-265.
8. LIMA C L R. (2004). Compressibilidade de solos versus intensidade de tráfego em um pomar de laranja e pisoteio animal em pastagem irrigada. [Tese Doutorado em Agronomia]. Departamento de Solos e Nutrição de Plantas, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP;2004.70p.
9. OQUENDO G L. Fomento y explotación de pastos y forrajes: ACPA.Proyecto (DWHH: LA1077/ZAK 1001-01); 2002.
10. SIMPSON 1980. Metodo para la extraccion de muestras de suelos; 1980
11. SMITH D, DICKSON J. Contributions of vehicle weight and ground pressure to soil compaction. Journal of Agricultural Engineering Research, London. 1990; 46 (1) :13-29.

12. STOLF R. Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. R. bras. Ci. Solo, Campinas, 15:229-235. Brasil; 1991.
13. TAYLOR J, GILL W (1984). Soil compaction: State-of-art report. Journal of Terramechanics, Oxford. 1984; 21 (3).195-213.
14. THOMASSON A.J (1978). Towards an objective classification of soil structure. J. Soil Sci., Oxford. v. 29;1978. 38-46p.
15. USDA. Soil survey manual. Washington, DC, USA, Soil Survey Division Staff. 437p. (Handbook, 18); 1993.

Recibido: [18 diciembre 2025] Aceptado: [24 enero 2026] Publicado: [15 marzo 2026]

Citation: Núñez, R; López, V; Álvarez, A. Estudio de la variabilidad espacial de la resistencia de penetración en un vertisol pélico de la cuenca del río Cauto. Bionatura, 2026. Volumen 11, No 1.

<https://doi.org/10.70373/RB/2026.11.01.10>

Peer review information: Bionatura thanks the anonymous reviewers for their contribution to the peer review of this work using <https://reviewerlocator.webofscience.com/>

All articles published by Bionatura Journal are freely and permanently accessible online immediately after publication, without subscription charges or registration barriers.

Publisher's Note: Bionatura stays neutral concerning jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license

(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



Durante los últimos 8 años, la Estación Experimental Central de la Amazonía del INIAP ha revolucionado la producción de cacao en la región amazónica ecuatoriana mediante sistemas agroforestales que mejoran la salud del suelo, aumentan la biomasa y secuestran carbono, superando las prácticas tradicionales.

Estas innovaciones están transformando la economía local y protegiendo el medio ambiente.

EL NUEVO
**ECUADOR
RESUELVE**

Instituto Nacional de
Investigaciones Agropecuarias



LICOR DE MARACUYÁ

(Passiflora edulis)

El licor de maracuyá es una bebida espirituosa, dulce y exótica, caracterizada por su intenso aroma tropical, color amarillo brillante o dorado y un equilibrio perfecto entre el dulzor y la acidez natural de la fruta.

Sus componentes bioactivos, como antioxidantes (carotenoides), flavonoides y triptófano, ofrecen beneficios antiinflamatorios, relajantes, cardiovasculares y digestivos, además de ayudar a la salud de la piel y el sistema inmunológico.

CONTACTO: Dr. Julio Pineda Insuasti, PhD
info.biodiversity@gmail.com, Cel. +593 99 758 9267. Ibarra-Ecuador
SCIENTIFIC PARTNER: <https://cebaecuador.org/>
inf.ceba@gmail.com, Cel + 593 99 579 7813. Ibarra-Ecuador





El Laboratorio de Secuenciación de Ácidos Nucleicos del INABIO cuenta con cerca de **3.500** tejidos criopreservados y **1.300** secuencias de ácidos nucleicos de diferentes especies de plantas y vertebrados. Se han secuenciado genomas completos de cuatro bacterias, permitiendo el desarrollo científico en la descripción de nuevas especies, y la aplicación de herramientas moleculares en proyectos de investigación aplicada y monitoreo de la biodiversidad.

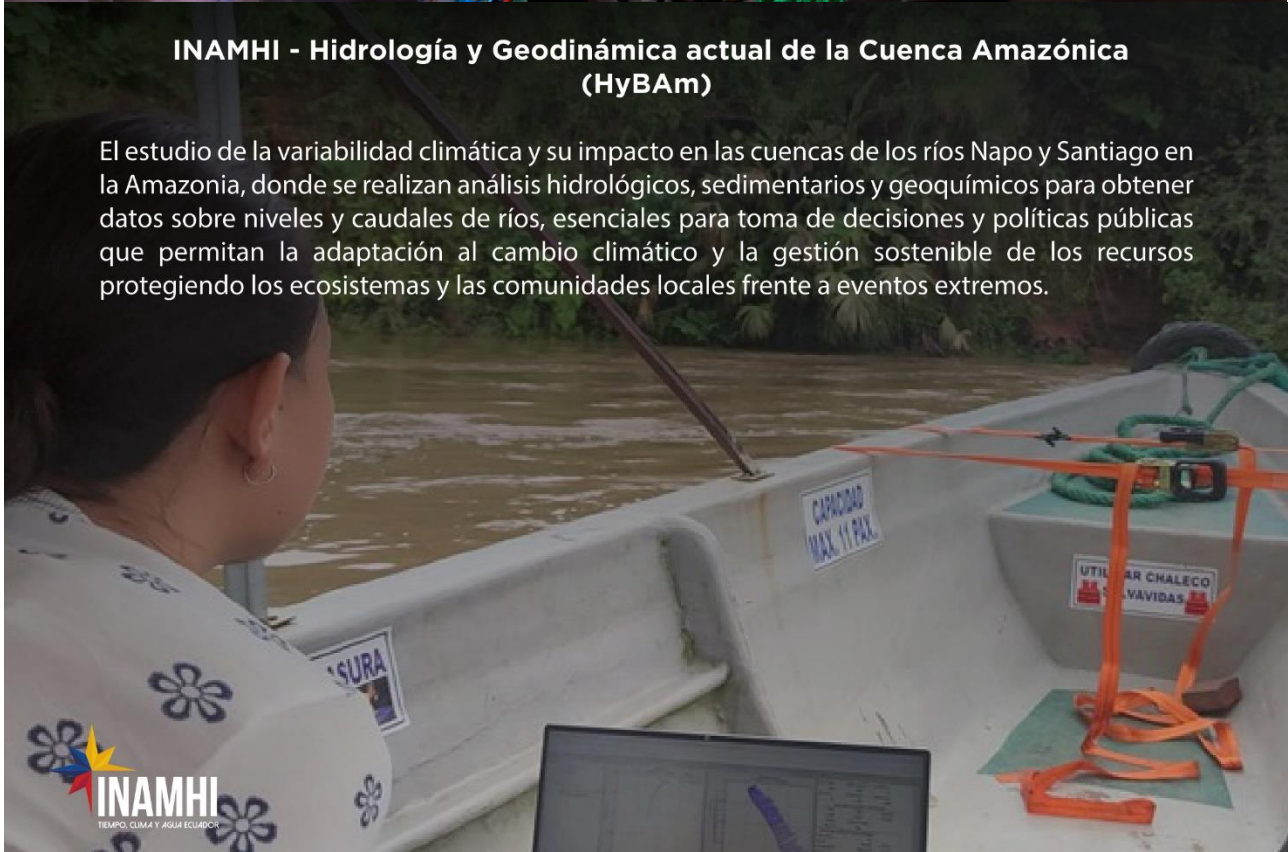
El conocimiento de nuestra biodiversidad, y el desarrollo de la ciencia y tecnología son la base para el fomento de la bioeconomía en el Ecuador.

EL NUEVO
**ECUADOR
RESUELVE**

Instituto Nacional
de Biodiversidad

INAMHI - Hidrología y Geodinámica actual de la Cuenca Amazónica (HyBAm)

El estudio de la variabilidad climática y su impacto en las cuencas de los ríos Napo y Santiago en la Amazonia, donde se realizan análisis hidrológicos, sedimentarios y geoquímicos para obtener datos sobre niveles y caudales de ríos, esenciales para toma de decisiones y políticas públicas que permitan la adaptación al cambio climático y la gestión sostenible de los recursos protegiendo los ecosistemas y las comunidades locales frente a eventos extremos.



INAMHI
TIEMPO, CLIMA Y AGUA ECUADOR



INSTITUTO PÚBLICO DE
INVESTIGACIÓN DE ACUICULTURA Y PESCA
ECUADOR



***Caristius* sp.**

Los análisis de identificación taxonómica del Ictioplancton se realizan a través de métodos tradicionales y metodologías estándares que permiten determinar épocas y zonas de desove de las principales especies hidrobiológicas, son realizados en los Laboratorios de Ictioplancton del Instituto Público de Investigación de Acuicultura y Pesca - IPIAP.



Secretaría de
Educación Superior, Ciencia,
Tecnología e Innovación



Contacto

<https://www.facebook.com/BiodiversityEC>

info.biodiversity@gmail.com

Cel.: +593 99 758 9267

Ibarra-Ecuador.



CALÉNDULA (*Caléndula officinalis*)

BENEFICIOS:

Ayuda a proteger los ojos del daño causado por la luz azul y los radicales libres, reduciendo el riesgo de degeneración macular y cataratas.

CONTACTO:

Dr. Julio Pinedalnsuasti, PhD.

info.biodiversity@gmail.com

Cel. +593 99 758 9267

Ibarra-Ecuador

SCIENTIFIC PARTNERS: <https://cebaecuador.org/>



21/11/2025

info.biodiversity@gmail.com

Instrucciones a los autores

Los Trabajos serán Inéditos: Una vez aprobados, no podrán someterse a la consideración de otra revista, con vistas a una publicación múltiple, sin la debida autorización del Comité Editorial de la Revista. La extensión máxima será 8 cuartillas para los trabajos originales, 12 las revisiones y 4 las comunicaciones breves e informes de casos, incluidas las tablas y figuras.

Los artículos se presentarán impresos (dos ejemplares). Todas las páginas se numerarán con arábigos y consecutivamente a partir de la primera. Estos deben acompañarse de una versión digital (correo electrónico o CD) en lenguaje Microsoft Word, sin sangrías, tabuladores o cualquier otro atributo de diseño (títulos centrados, justificaciones, espacios entre párrafos, etc.). Siempre se ha de adjuntar la carta del consejo científico que avala la publicación y una declaración jurada de los autores. Referencias Bibliográficas. Se numerarán según el orden de mención en el texto y deberán identificarse mediante arábigos en forma exponencial. Los trabajos originales no sobrepasarán las 20 citas; las revisiones, de 25 a 50 y las comunicaciones breves e informes de casos. En las Referencias en caso de que las publicaciones revisadas estén online se debe proveer un enlace consistente para su localización en Internet. Actualmente, no todos los documentos tienen DOI, pero si lo tienen se debe incluir como parte de las referencias. Si no tuviese DOI, incluir la URL.

Tablas, modelos y anexos: Se presentarán en hojas aparte (no se intercalarán en el artículo) y en forma vertical numeradas consecutivamente y mencionadas en el texto. Las tablas se ajustarán al formato de la publicación se podrán modificar si presentan dificultades técnicas. Figuras: Las fotografías, gráficos, dibujos, esquemas, mapas, salidas de computadora, otras representaciones gráficas y fórmulas no lineales, se denominarán figuras y tendrán numeración arábica consecutiva. Se presentarán impresas en el artículo en páginas independientes y en formato digital con una resolución de 300 dpi. Todas se mencionarán en el texto. Los pies de figuras se colocarán en página aparte. El total de las figuras y tablas ascenderá a 5 para los trabajos originales y de revisión y 3 para las comunicaciones breves e informes de casos. Abreviaturas y siglas: Las precederá su nombre completo la primera vez que aparezcan en el texto. No figurarán en títulos ni resúmenes. Se emplearán las de uso internacional. Sistema Internacional de Unidades (SI): Todos los resultados de laboratorio clínico se informarán en unidades del SI o permitidas por este. Si se desea añadir las unidades tradicionales, se escribirán entre paréntesis. Ejemplo: glicemia: 5,55 mmol/L (100 mg/100 mL). Para facilitar la elaboración de los originales, se orienta a los autores consultar los requisitos uniformes antes señalados disponibles en: http://www.fisterra.com/recursos_web/mbelvancouver.htm#ilustraciones%20 (figura) Los trabajos que no se ajusten a estas instrucciones, se devolverán a los autores. Los aceptados se procesarán según las normas establecidas por el Comité Editorial. El arbitraje se realizará por pares y a doble ciego en un período no mayor de 60 días. Los autores podrán disponer de no más de 45 días para enviar el artículo con correcciones, se aceptan hasta tres reenvíos. El Consejo de Redacción se reserva el derecho de introducir modificaciones de estilo y /o acotar los textos que lo precisen, comprometiéndose a respetar el contenido original. El Comité Editorial de la Revista se reserva todos los derechos sobre los trabajos originales publicados en esta.



Periférico Sur s/n, San Antonio. Ibarra – Ecuador

<https://bioecologicos.com/>

<https://www.facebook.com/BioecologicosEC/>

Email: bioecologicosec@gmail.com

Cel.: +593 99 5968529

Docencia, investigación,
extensión y proyección
social al servicio del territorio



Fortalezas institucionales

- Biotecnología
- Limnología
- Derechos Humanos – Posconflicto
- Internacionalización
- Inclusión Social
 - SER – Servicio Educativo Rural
 - Educación de Alfabetización
- MIES – Instituto de formación para el trabajo y el desarrollo humano
- Formación humanística “Ruta Humanística en el currículo - Cátedra abierta Madre de la Sabiduría”
- Investigación y desarrollo tecnológico
- Comprometida con la calidad
- Centro de Estudios Territoriales
- Biodiversidad
 - Herbario
 - Ictiología
 - Litoteca

Áreas del conocimiento

- Ciencias Agropecuarias
 - Ciencias de la Educación
 - Ciencias de la Salud
 - Ciencias Económicas y Administrativas
 - Ciencias Sociales
 - Derecho
 - Ingenierías
 - Teología y Humanidades
- 26 programas de pregrado
➤ 16 programas de posgrado
 - 1 doctorado
 - 8 maestrías
 - 7 especializaciones

www.uco.edu.co [universidad.catolicadeoriente](https://www.facebook.com/universidad.catolicadeoriente) [@uconiano](https://twitter.com/uconiano)



“Servicio educativo con calidad en
Personas, procesos y servicios”

Contacto institucional Universidad Católica de Oriente
Sector 3, Cra. 46 No. 40B 50 - **PBX:** +(57)(4) 569 90 90. Ext. 694
Fax: +(57)(4) 531 39 72 - **Email:** uco@uco.edu.co

