

Vol. 17, nro. 2 (2025)

ISSN(e): 2528-7788

aci

avances
en ciencias e
ingenierías



USFQ
PRESS

aci

avances
en ciencias e
ingenierías

ACI Avances en Ciencias e Ingenierías es una revista científica internacional, multidisciplinaria y de acceso abierto. Tiene periodicidad bianual (mayo y diciembre).

Editores en jefe

Eva O.L. Lantsoght

Colegio de ciencias e ingenierías,
Universidad San Francisco de Quito USFQ, Ecuador y
Department of Engineering Structures
Delft University of Technology, Países Bajos

Mateo Dávila-Játiva

Colegio de ciencias biológicas y ambientales,
Universidad San Francisco de Quito USFQ, Ecuador

Editores asociados

Elisa Bonaccorso

Colegio de ciencias biológicas y ambientales,
Universidad San Francisco de Quito USFQ, Ecuador

Laura Céspedes Arias

Committee on Evolutionary Biology, The University of
Chicago, Field Museum of Natural History, United States

Oscar Camacho

Colegio de ciencias e ingenierías,
Universidad San Francisco de Quito USFQ, Ecuador

Sebastián Ponce

Colegio de ciencias e ingenierías,
Universidad San Francisco de Quito USFQ, Ecuador

Edgar Carrera Jarrín

Colegio de ciencias e ingenierías,
Universidad San Francisco de Quito USFQ, Ecuador

Patricio Rojas Silva

Colegio de ciencias biológicas y ambientales,
Universidad San Francisco de Quito USFQ, Ecuador

Dennis Cazar Ramírez

Colegio de ciencias biológicas y ambientales,
Universidad San Francisco de Quito USFQ, Ecuador

Gabriel Trueba Piedrahita

Colegio de ciencias biológicas y ambientales,
Universidad San Francisco de Quito USFQ, Ecuador

Jordi Aguiló Gisbert

Departamento de Medicina y Cirugía Animal,
Universidad Cardenal Herrera CEU, España

Consejo editorial

Nikolay Aguirre

Universidad Nacional de Loja, Ecuador

Johannio Marulanda Casas

Universidad del Valle, Colombia

César Iván Álvarez-Mendoza

Universität Augsburg, Alemania

Oswaldo Morales Nápoles

Delft University of Technology, Países Bajos

John Blake

University of Florida, Estados Unidos

Yenisel Plasencia-Calaña

Maastricht University, Países Bajos

María de Lourdes Torres

Universidad San Francisco de Quito USFQ, Ecuador

Luis Rincón

Universidad de Los Andes, Venezuela

Salvador Godoy

Instituto Politécnico Nacional, México

Santiago Ron Pontificia

Universidad Católica del Ecuador, Ecuador

Juan Manuel Guayasamín

Universidad San Francisco de Quito, Ecuador

Carlos Ventura

The University of British Columbia, Canadá

Comité científico internacional

Rafael Angarita

Institut Supérieure d'Electronique de Paris (ISEP), Francia

Sebastián Castellanos Toro

Universidad del Quindío, Colombia

Carlos Jaime Barrios

Universidad Industrial de Santander, Colombia

José Cerca

Universidad de Oslo, Noruega

Bertrand Berche

Université de Lorraine, Francia

Rolando Chacón

Universitat Politècnica de Catalunya BarcelonaTECH, España

Patricia Conde Céspedes
ISEP - école d'ingénieurs du numérique, Francia

Livio Conti
Università Telematica Internazionale Uninettuno, Italia

Alex Micael Dantas De Sousa
São Paulo State University (UNESP), Brasil

Paula Folino
Universidad de Buenos Aires, Argentina

Gabriela Guevara
Universidad Técnica de Berlín, Alemania

Isidoro Gitler
Center for Research and Advanced Studies of the National
Polytechnic Institute (CINVESTAV), México

Jaime Gonzalez-Libreros
Luleå Tekniska Universitet, Suecia

Eloisa Hasing
University of Alberta, Canadá

Jorge Humberto Heredia
Universidad Tecnológica Equinoccial, Ecuador

Oliver Merchiers
Institut National des Sciences Appliquées (INSA), Francia

Victor Murray
Memorial Sloan-Kettering Cancer Center, Estados Unidos

Francisco Javier Morales Yáñez
Universidad de Lieja, Bélgica

Monica Santamaría-Ariza
University of Minho, Portugal

Rafael Sanabria Díaz
TNO - Nederlandse Organisatie voor toegepast-
natuurwetenschappelijk onderzoek

Rinaldo Santonico
Universidad de Roma Tor Vergata, Italia

Fabian Salgado-Roa
University of Texas at Austin, Estados Unidos

Luca Sorriso-Valvo
Consiglio Nazionale delle Ricerche, Italia

Raquel Quishpe
Instituto Tecnológico de Karlsruhe, Alemania

Matías Valenzuela
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Chile

Julio Valdivia-Silva
Universidad de Ingeniería & Tecnología, Perú

Miguel Reina Ortiz
Universidad de Indiana, Estados Unidos

Paula Rojas
Universidad Adolfo Ibáñez, Chile

Catalina Palacios
SELVA, Colombia

Producción editorial
USFQ PRESS

Corrección de estilo y ortotipográfica
Alejandra Larrea, Reema Azar y Janine Berger

Diseño y diagramación
Krushenka Bayas Ramírez

Fotografía de cubierta
Freepik

Webmaster y manejo de OJS
Scímago



Esta obra está bajo una licencia **Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0)**. El uso de nombres descriptivos generales, nombres comerciales, marcas registradas, etcétera, en esta publicación no implica, incluso en ausencia de una declaración específica, que estos nombres están exentos de las leyes y reglamentos de protección pertinentes y, por tanto, libres para su uso general.

USFQ Press y el equipo editorial de ACI Avances en Ciencias e Ingenierías han aplicado el mayor cuidado razonable en los procesos de selección, revisión por pares, edición y publicación. Sin embargo, no puede excluirse la posibilidad de que el contenido publicado contenga errores, imprecisiones u omisiones. Los contenidos son de exclusiva responsabilidad de sus autores.

Para correspondencia, comunicarse con:

Eva O.L. Lantsoght/ Mateo Dávila-Játiva, editores en jefe
Universidad San Francisco de Quito USFQ
Calle Diego de Robles S/N Pampite. Campus Santiago Gangotena
Quito 170901, Ecuador.

Correo electrónico:

avances@usfq.edu.ec - usfqpress@usfq.edu.ec

ACI Avances en Ciencias e Ingenierías es publicada por USFQ PRESS, casa editorial de la Universidad San Francisco de Quito USFQ y es parte de las siguientes bases, catálogos e índices:

Directorios e índices de revistas académicas



Repositorios regionales y temáticos



Motores de búsqueda y grandes bases de datos



Servicios de apoyo a la publicación académica



Plataformas y directorios dedicados a la ciencia abierta y el acceso abierto



Recursos de archivo



Plataformas



Contenido

Vol. 17, nro. 2 (2025)

Editorial

Editorial

An Act of Resistance: The Role of Local Journals

Un acto de resistencia: el rol de las revistas locales

Mateo Dávila-Játiva

Drug resistance profiles in patients attending to an HIV clinic in Quito: a pilot study

Caracterización de los perfiles de resistencia a los medicamentos contra el VIH en pacientes de un centro de atención en Quito: "Un estudio piloto"

Paulina Quirola Amores, Pablo Espinosa, Nelson Cevallos, Enrique Terán.

Biopolímeros y nanotecnología - alternativas eco-amigables circulares y sostenibles en la Recuperación Mejorada de Petróleo (RPM)

Biopolymers and Nanotechnology: eco-friendly and sustainable alternative in Enhanced Oil Recovery

Edwards Naranjo, Inés Hernández Guerra, Lourdes Orejuela-Escobar

De residuos a biopolímeros: fermentación anaeróbica como ruta sostenible para la producción de polihidroxicanoatos

From waste to biopolymers: anaerobic fermentation as a sustainable pathway for polyhydroxyalkanoates production

Rolando Calero, Herrera Brunnet

Towards a Definition of Computing Continuum

Hacia una definición del Computing Continuum

Pablo Josue Rojas Yepes, Carlos Jaime Barrios Hernández, Oscar Carrillo, Frédéric Le Mouël

Pol+NBU: A Feasibility study in Generating High-Resolution Adversarial Images with a Black Box Evolutional Algorithm based Attack

Pol+NBU: Un estudio de viabilidad en la generación de imágenes adversariales de alta resolución con un ataque basado en algoritmos evolutivos de caja negra

Enea Mancellari, Ali Osman Topal, Franck Leprévost

The contribution of mutation induction to crop improvement: Addressing climate change and ensuring food security

La contribución de la inducción de mutaciones a la mejora de cultivos: abordando el cambio climático y garantizando la seguridad alimentaria

Raymond Joseph, Viviane Kopp da Luz, Amanda Valentini Baseggio, Adriana Pires Soares, Bresolin, Antonio Costa De Oliveira

Desarrollo de una propuesta de producción de espirulina en polvo aplicando principios de economía circular para la industrialización

Development of a proposal for the production of spirulina powder applying circular economy principles for industrialization.

Jonathan Javier Sayavedra Delgado, Estefanía Haro-Viteri, Marielisa Bravo Cordero, José Álvarez-Barreto

Efecto de la suplementación con ensilaje de maíz y yuca en el desempeño productivo y económico del ovino criollo (*Ovis aries*)

Effect of corn and cassava silage on the economic and productive performance of hair creole sheep (*Ovis aries*)

Liliana Atencio Solano, Emiro Suarez Paternina, José Jaime Tapia Coronado, Yacerney Paternina Paternina, Wilson Barragan Hernández, Lorena Mestra Vargas

Validación del método empírico para la obtención de densidad de madera de especies altoandinas

Validation of the empirical method for obtaining wood density of high Andean species

Alberto Macancela-Herrera, Pedro X Astudillo, Byron Ortega-Pillajo

Caracterización mecánica de la tenacidad a la fractura en modo I de laminados impresos multidireccionales de fibra continua

Mechanical characterization of mode I fracture toughness in multidirectional printed continuous fiber laminates.

Jonnathan D. Santos, Luis Córdova Narváez, José Quichimbo

Organismos fotosintéticos y calidad de agua en ríos amazónicos, caso de estudio Yacuambi, Zamora Chinchipe

Photosynthetic organisms and water quality in Amazonian rivers, case study Yacuambi, Zamora Chinchipe

Alonso Cartuche, Nikolay Aguirre, Roberth Yaguana, Roberto Bustillos, Vinicio Alvarado, Max Encalada, Josselyn Balcazar

First predation record of the Galapagos Hawk *Buteo galapagoensis* (Accipitriformes: Accipitridae), on a feral cat *Felis catus* (Carnivora: Felidae)

Primer registro de depredación del gavián de Galápagos *Buteo galapagoensis* (Accipitriformes: Accipitridae), sobre un gato feral *Felis catus* (Carnivora: Felidae)

Elias Viteri-Basso, Johannes Ramirez Kastdalen, Jorge Carrión-Tacuri

El verdadero origen de la pandemia COVID-19

The real origin of the COVID-19 pandemic

Gabriel Trueba

An Act of Resistance: The Role of Local Journals

Mateo Dávila-Játiva¹ 

¹Universidad San Francisco de Quito, Colegio de Ciencias Biológicas y Ambientales, Instituto de Biodiversidad Tropical IBIOTROP, Laboratorio de Zoología Terrestre, Quito, Ecuador

"Autor para correspondencia/Corresponding author: mdavilajativa@usfq.edu.ec

When I was an undergraduate student, the idea of students publishing their research was almost unheard of among my peers. Writing a scientific paper, submitting it to a journal, and receiving feedback from reviewers felt distant, a process reserved for established scientists. My first experience with publication was only possible thanks to an extraordinary mentor who guided and encouraged me through every step. Even with that support, it felt like stepping into unfamiliar and unwelcoming territory. Not all first-time authors are lucky enough to have such guidance, and it should not be necessary.

Local journals can make this path less daunting. They are not only publication outlets but learning spaces, where new researchers begin to understand how scientific communication works. When editors and reviewers approach their work as mentors rather than gatekeepers, the editorial process becomes less about fear and more about growth. This is where young scientists learn that science is a dialogue they are invited to join.

Behind every published article there are students, mentors, and collaborators who have invested time, curiosity, and passion into understanding a fragment of the cosmos. The editorial process is where those efforts meet another set of invisible collaborators: editors and reviewers. Their work, if done correctly, allows a journal to function as a space for exchange. The tone of a review, the clarity of feedback, the respect shown toward an early-career researcher shape how people experience science. When handled with care, this process builds trust, not only in the journal, but in science itself.

Beyond their educational role, local journals sustain the scientific ecosystems in which they exist. They give visibility to local research, studies that address the specific challenges, biodiversity, and cultures of their region. They are places where science meets its own landscape and allows data and context to converge. Publishing locally connects scientific practice to the realities that surround it and ensures that knowledge flows back into the community where it is based.

When we talk about scientific impact, we often look outward: to impact factors, international collaborations, and citations. But there is another kind of impact, quieter and harder to measure, the impact of a young scientist encouraged to publish for the first time and join the scientific conversation; the impact of a paper that informs local policy or education; the impact of collaboration between neighboring institutions working toward the same goal. Local journals make those impacts possible. They hold space for science that speaks to its own territory and responds to its own needs.

In today's publishing environment, where predatory journals exploit the pressure to publish, the presence of trustworthy, community-oriented outlets is more valuable than ever. These journals do not compete for prestige; they earn respect through



Licencia Creative Commons
Atribución-NoComercial 4.0



Recibido /
Received:
31/10/2025

Publicado en línea /
Published online:
09/12/2025



transparency, integrity, and care, promoting a scientific practice where publication is not a transaction, but a conversation. Local journals grounded in academic integrity and shared purpose protect the essence of science as a collective endeavor. They remind us that publishing is not merely about producing papers, but about fostering understanding, curiosity, and connection.

Ultimately, the value of local journals lies in the kind of science they help create, science that is transparent, inclusive, and responsive to its context. Their goal is to strengthen a culture of collaboration over competition, and curiosity over prestige: a science that is, above all, humane. For those of us involved in the editorial process, this is both a responsibility and a privilege.

Local journals are, in the end, acts of resistance. They stand as proof that rigorous and meaningful research can emerge anywhere people are willing to observe carefully, think critically, and share openly. By valuing context, collaboration, and accessibility, local journals remind us that good science is not defined by where it is published, but by the quality of its questions and the care with which it seeks answers.

Characterization of HIV drug resistance profiles in patients at a healthcare center in Quito: "A pilot study"

Paulina Quirolo-Amores¹, Pablo Espinosa^{2,3}, Nelson Cevallos⁴, Enrique Terán^{2*}

¹ Instituto de Microbiología, Universidad San Francisco de Quito USFQ, Quito, Ecuador.

² Colegio de Ciencias de la Salud, Universidad San Francisco de Quito USFQ, Quito, Ecuador.

³ Universidad Internacional del Ecuador UIDE, Facultad de Ciencias de la Vida y Salud, Quito, Ecuador

⁴ Hospital Enrique Garcés, Ministerio de Salud Pública del Ecuador, Quito, Ecuador

*Autor para correspondencia/Corresponding author: eteran@usfq.edu.ec

Caracterización de los perfiles de resistencia a los medicamentos contra el VIH en pacientes de un centro de atención en Quito: "Un estudio piloto"

Abstract

HIV/AIDS is one of the most important chronic infectious diseases. Although ART therapies have decreased morbidity and mortality considerably, new cases continue to appear. HIV-1 drug resistance is one of the most important problems that delay 95-95-95 goals. The presence of drug resistance mutations in naïve and ART-experienced patients is considered a risk factor for treatment failure and the transmission of HIV-1 resistance strains. A cross-sectional study included naïve and ART-experienced patients from one health care center in Quito, Ecuador in 2019 and 2021. Demographic data was collected with blood samples for sequencing, genotyping, and resistance tests. In 42 patients recruited, the overall prevalence of HIV-1 DRM was 9.5 %, most related to NNRTI. A total of 42 mutations were found, 38.6 % related to PIs, 34.09 % to NNRTI/NRTIs, and 22.7 % to INSTIs, most of them considered as minor or accessories, producing PLLR, LLR, and, in one patient, HLR to NNRTIs. Although few drug resistance mutations that reduce ART susceptibility were identified, further studies are required to characterize HIV-1 drug resistance in Ecuador and its implications for clinical response.

Keywords: HIV, HIV-1, ART, drug resistance, HIV/AIDS, NNRTI, INSTI, DRM.

Resumen

El VIH/SIDA es una de las enfermedades infecciosas crónicas más importantes a nivel mundial en los últimos años. Aunque las terapias antirretrovirales (TAR) han reducido considerablemente la morbilidad y la mortalidad por VIH, existe un reporte continuo de nuevos casos. La resistencia a TAR contra el VIH-1 es uno de los problemas más importantes que retrasan los objetivos 95-95-95 establecidos por la Organización Mundial de la Salud, que como objetivo busca conseguir que los pacientes que viven con VIH (PVV) conozcan su diagnóstico, reciban tratamiento y eviten la transmisión del virus. La resistencia al TAR se da por la presencia de mutaciones en el genoma del VIH-1, tanto en pacientes que han recibido previamente tratamiento como aquellos que lo inician; constituyendo un factor de riesgo asociado al fracaso terapéutico y la transmisión de cepas resistentes al VIH-1. Se realizó un estudio observacional tipo transversal para determinar el perfil



Licencia Creative Commons
Atribución-NoComercial 4.0



Editado por /
Edited by:
Gabriel Trueba

Recibido /
Received:
25/04/2025

Aceptado /
Accepted:
04/12/2024

Publicado en línea /
Published online:
04/07/2025



de resistencia a TAR que incluyó pacientes que recibieron o no previamente TAR en la unidad de VIH de un hospital en Quito, Ecuador, durante 2019 y 2021. Se recopilaron datos demográficos junto con muestras de sangre para secuenciación, genotipificación y determinación de mutaciones asociadas con la resistencia a TAR. En los 42 pacientes reclutados, la prevalencia mutaciones de resistencia a TAR (DRMs) para VIH-1 fue del 9.5%; siendo relacionadas con los fármacos inhibidores de la transcriptasa reversa no nucleosídicos (NNRTI). Se identificaron un total de 42 mutaciones: 38.6% relacionadas con los fármacos inhibidores de la proteasa (PIs), 34.09% con NNRTI/ inhibidores de la transcriptasa reversa nucleosídicos (NRTIs) y 22.7% con los fármacos inhibidores de la translocación de la integrasa (INSTIs), la mayoría de ellas consideradas menores o accesorias sin repercusión en la sensibilidad a TAR; ocasionando una potencial resistencia de bajo nivel (PLLR), resistencia de bajo nivel (LLR) y, en un paciente, alto nivel de resistencia (HLR) exclusivamente para los NNRTIs. Aunque se identificaron escasas mutaciones relacionadas con la resistencia a las diferentes combinaciones de TAR en el grupo de pacientes, se requieren estudios adicionales para caracterizar la resistencia a medicamentos del VIH-1 en Ecuador, su y sus implicaciones en la respuesta clínica.

Palabras clave: VIH, VIH-1, ART, resistencia a medicamentos, VIH/SIDA, NNRTI, INSTI, DRM.

INTRODUCTION

HIV/AIDS remains one of the most significant chronic transmissible diseases globally, affecting approximately 39 million people. In 2022, around 63,000 people died from HIV-1 infection, and at least 1.3 million new cases were reported annually, with the majority occurring in individuals over the age of 15 [1]. The introduction of antiretroviral therapy (ART) has greatly improved the management of HIV/AIDS cases by treating all diagnosed individuals, regardless of viral load or HIV/AIDS stage, improving access to care, and significantly reducing mortality and comorbidities in at least 51% [2]. New HIV cases have risen significantly worldwide in recent years (1.3 million), and 14% of people living with HIV (PLHIV) remain unaware of their status. Only 76% of diagnosed individuals have access to ART. This contributes to treatment delays, as late intervention often coincides with advanced HIV/AIDS, making treatment less effective and increasing the risk of opportunistic infections, complications, and viral transmission [3].

The World Health Organization (WHO) and the Joint United Nations Programme on HIV/AIDS (UNAIDS) proposed the 95-95-95 strategy, which aims to ensure that by 2025, 95% of people living with HIV know their status, 95% of those diagnosed receive antiretroviral therapy (ART), and 95% of those on ART achieve undetectable viral loads [4]. While significant progress has been made, this goal has challenges that still need attention. Critical factors have been identified as challenges, including achieving undetectable viral loads and managing poor clinical outcomes and complications such as co-infections. These setbacks are often driven by factors such as patient adherence issues, high rates of treatment discontinuation due to social challenges, poor retention in care, and ART resistance [5,6]. ART resistance is particularly linked to the HIV-1 viral ability to replicate and, in the presence of selective drug pressure, generate drug



resistance mutations (DRMs), which can compromise the efficacy of ART, leading to poor therapeutic responses and treatment failure [7].

At least 26% of HIV/AIDS patients who start antiretroviral therapy (ART) carry HIV-1 strains resistant to first-line treatments, especially to Non-Nucleoside Reverse Transcriptase Inhibitors (NNRTIs) that are considered the backbone of ART. Several strategies have been implemented to address this issue, such as avoiding NNRTIs when the prevalence of drug resistance mutations (DRMs) exceeds 10%, strengthening adherence support, and improving patient retention in care [8]. The World Health Organization (WHO) has also established an effective HIV drug resistance surveillance program that monitors the most common DRMs worldwide and recommends resistance testing for all individuals who initiate or restart ART [9,10]. Additionally, international databases and collaborations also consolidate and analyze the described DRMs, assessing resistance levels and estimating the likelihood of treatment failure for ART-naïve and experienced patients [11].

The prevalence of pre-treatment drug resistance (PDR) mutations in ART-naïve patients to commonly used antiretroviral therapy drugs varies significantly depending on patient type, country, and other factors. It ranges from 5% to 30% in adults starting any ART, with 5.4% corresponding to Nucleoside Reverse Transcriptase Inhibitors (NRTIs), 12.9% to Non-Nucleoside Reverse Transcriptase Inhibitors (NNRTIs), 0.4% to Protease Inhibitors (PIs), and 0.6% to Integrase Strand Transfer Inhibitors (INSTIs). These values increase in patients with prior ART experience. In Latin America, the prevalence of NNRTI resistance is notably higher, at 16.7% among treatment-naïve patients and 26.7% among those previously exposed to ART. This underscores the challenges of continuing NNRTI-based regimens in the region and highlights the need for regimens with drugs that have a high genetic barrier, such as dolutegravir (DTG). It also emphasizes the importance of ensuring that all people living with HIV (PLHIV) are included in national treatment programs [8,12].

In 2020, Ecuador reported 47,000 people living with HIV (PLHIV), including 2,823 new cases. From these, 85% knew their status, 74% received ART, and 65% achieved viral suppression. The HIV/AIDS mortality rate was 4.8 per 100,000 inhabitants, with 44 deaths. Most cases occurred in key and vulnerable populations, such as young adults (ages 19-49), sex workers, and men who have sex with men (MSM), primarily in the provinces of Guayas, Manabí, and El Oro [13]. National efforts have reduced mortality and morbidity and increased timely diagnosis through rapid testing. Care and follow-up are provided in national public hospitals offering ART regimens [14]. Since 2021, most healthcare centers have transitioned from NNRTI- to DTG-based regimens. ART resistance in naïve and experienced patients in Ecuador is not well characterized, potentially leading to poor clinical outcomes. This study aimed to determine the prevalence and profile of HIV-1 drug resistance mutations (DRMs) at an HIV healthcare center in Quito between 2019 and 2021.

MATERIALS AND METHODS

Study population

A cross-sectional study was conducted at the HIV healthcare center of Enrique Garces Hospital between April and May 2019 and from August to September 2021. The study



included patients aged 18 and older with confirmed HIV/AIDS diagnoses, both treatment-naïve and ART-experienced, who regularly received care at the center. Participants were invited to join the study on different days, and those who voluntarily agreed provided written informed consent. They also completed a socio-demographic questionnaire. Each participant was assigned a unique code to ensure the anonymization of the data, which was used solely for research purposes.

Clinical data, including CD4+ cell counts, viral load, and ART history, were retrieved from the medical records provided by their physicians or through a study-specific questionnaire, and a blood sample was required by the patient for genotyping and identification of significant DRMs. The study was approved by the Ethics Committee of Universidad San Francisco de Quito USFQ (2021-085M) in compliance with the ethical principles outlined in the Declaration of Helsinki.

Collection Samples and RNA extraction

Blood specimens were obtained via venipuncture from the forearm (approximately 10 mL) and collected in ethylenediaminetetraacetic acid (EDTA) Vacutainer tubes (BD, San Jose, CA) on the day of enrollment at the clinical care center, following WHO guidelines [15]. Each patient sample was assigned a unique identifier to ensure anonymity. Samples were processed immediately to separate plasma by centrifugation at 5,000 rpm for 10 minutes at 4°C, after which plasma was aliquoted and stored at -20°C until further use. For RNA extraction, a 1 mL plasma aliquot per patient was centrifuged at 14,000 rpm for two hours at 4°C to concentrate HIV particles. The QIAamp Viral RNA Mini Kit (Qiagen, Hilden, Germany) was used to extract RNA, following the manufacturer's protocol.

HIV-1 amplification and sequencing

Reverse transcription of a 1kb fragment of *pol* gene that includes protease PR (codons 6-99) reverse transcriptase RT (codons 1-251), nucleotides 2268-3303, and a second fragment of 0.8kb of integrase IN (codons 1-288) nucleotides 4231-5094 (WHO standard PR 10-93, RT 41-238, IN 51-263) [16] was performed using the Thermoscript Reverse Transcriptase enzyme (Invitrogen, Carlsbad, CA) following the manufacturer's instructions. Both gene fragments were amplified by nested polymerase chain reaction (PCR) using Platinum Taq polymerase (Invitrogen, Carlsbad, CA), 50uL with 8 mM MgCl₂, 0.2 mM dNTP mix, 0.2 μM each primer [17]. The first PCR was made under the following conditions: 94°C, 2 min, 30 cycles at 94°C-20s, 50°C-20s, 72°C-90s, and the final extension of 72°C-6min. The second PCR was made under the following conditions: 94°C, 2 min, 40 cycles at 94°C-20s, 50°C-20s, 72°C-90s, and the final extension of 72°C-6min [17]. Direct cycle of Sanger sequencing was performed with seven overlapping segment primers using the ABI Prism BigDye Terminator v3.1 Cycle Sequencing kit and an ABI PRISM 3130xl Genetic Analyzer (Life Technologies, Carlsbad, CA). Sequence fragments were assembled using Sequencher version 4.5 (GeneCodes, Ann Arbor, MI). Gene cutter tool in the Los Alamos database was used to align nucleotides and identified coding (https://www.hiv.lanl.gov/content/sequence/GENE_CUTTER/cutter.html) to align nucleotides coding regions.



HIV-1 subtyping analysis and quality assurance

Base calling analysis and quality assurance was performed using RECall software/WHO HIVDR QC Tool (British Columbia Centre for Excellence in HIV/AIDS) [18], and a comparison of each was performed following WHO standards [16]; the presence of stop codons, APOBEC mutations, atypical mutations, and within-host similarity were checked. HIV-1 subtypes and circulating recombinant forms were identified using the Rega HIV subtyping tool V3 (<https://rega.kuleuven.be>) and the COMMENT online tool (<https://comet.lih.lu>). Recombination forms were confirmed using the RIP HIV Recombination Identification Program [19]. The mixture rate was also calculated according to the Stanford University algorithm, and HIVdb version 9.0 (<https://hivdb.stanford.edu/hivdb/>) was used [20].

Drug resistance mutations

HIV-1 mutations were identified and interpreted using the Stanford University HIVdb algorithm, version 9.0 (<https://hivdb.stanford.edu/hivdb/>), [20] which predicts resistance levels based on penalty scores assigned to each DRM: -level resistance (PLLR), 3) low-level resistance (LLR), 4) intermediate (I) and high-level resistance (HLR) to different ART. According to the penalty score, <10 is susceptibility, 10-14 potential low-level resistance, 15-29 low-level resistance, 30-59 intermediate resistance, and >60 high-level resistance. Those with "potential low-level resistance" were considered "susceptible," and "low-level, intermediate, and high-level" were considered "resistant" based on WHO recommendations [16,20]. Mutations without any drug susceptibility implications were considered polymorphisms, and those that may produce PLLR were not considered for the prevalence estimation.

Data Analysis

Demographic and clinical characteristics were summarized with 95% confidence intervals (CIs). A descriptive analysis was conducted with all variables considered normal data, using Shapiro Wilk ($n < 300$). All the above data were collected using IBM SPSS Statistics for Mac, version 25, and graphics were created using Prism GraphPad (V9.5.1).

Nucleotide Sequence Accession Numbers

HIV-1 sequences were submitted to GenBank with the following accession numbers: OR543092- OR543131.

RESULTS

Study participant characteristics and descriptive analysis

Forty-two patients were enrolled in the study (22 from 2021 and 20 from 2019). The mean age was 34.8 years (31.7-37.8). 88.4% of participants were male, and 9.3% were female. 42.9% were identified as MSM (men having sex with men), 35.7% were heterosexual, 21.4% were self-defined as bisexual, and 23.23% of the subjects were foreign.



Of the 42 subjects, 30.24% were categorized as ART drug-experienced and 67.4% as ART drug-naïve subjects. The average viral load and CD4+ count was 7.2×10^5 copies/mL and 267.68 cells/mm³, respectively. Also, 54.76% (23/42) were considered as only HIV-1 seropositive and 45.2% (19/42) as HIV/AIDS. Regarding coinfections, syphilis was found in 20% of MSM naïve patients and hepatitis B infection in 11.9%. All information was gathered from the clinical records and through a questionnaire. The remaining descriptive data are provided elsewhere (Table 1).

Regarding the selected ART regimens, among patients recruited in 2019, 38% (16/42) started with an Efavirenz (EFV)-based regimen as their first treatment, while in 2021, 21.4% (10/42) initiated a Dolutegravir (DTG)-based regimen. In both years, 14.2% (6/42) of patients received a protease inhibitor (PI)-based regimen as their first line of treatment. Among all ART-experienced patients, 38.4% were on an EFV-based regimen, and 23.8% were on a DTG-based regimen. Table 1 details the different regimens used in ART-naïve and experienced patients. In 2021, 60.5% of patients transitioned to a DTG-based regimen following national treatment guidelines.

TABLE 1. Antiretroviral regimens currently received by naïve and ART-experienced HIV patients attending a healthcare center in Quito.

ART regimens	Naïve n (%)	Experience n (%)
TDF/FTC+RAL	6 (20.7)	1 (7.7)
TDF/3TC+DTG	6 (20.7)	2 (15.4)
TDF/FTC+DTG	1 (3.4)	1 (7.7)
ABC/3TC+ATV/r	0	1 (7.7)
TDF/FTC/EFV	14 (48.3)	5 (38.5)
ABC/3TC+LP/r	0	1 (7.7)
TDF/FTC+RAL+DRV/r	0	1 (7.7)
TDF/FTC+DRV/r	2 (6.9)	0
AZT/3TC+LP/r	0	1 (7.7)
TDF/FTC+RAL+DTG	0	1 (2.3)
TDF/FTC+LP/r	1 (2.3)	0
ABC/3TC+EFV	1 (2.3)	0
TDF/FTC+DRV/r+ATV/r	0	1 (2.3)

Abbreviations: **TDF/FTC+RAL:** tenofovir/emtricitabine+raltegravir; **TDF/3TC+DTG:** tenofovir/lamivudine+dolutegravir; **TDF/FTC+DTG:** tenofovir/emtricitabine+dolutegravir; **ABC/3TC+ATV/r:** abacavir/lamivudine+ atazanavir boosted with ritonavir; **TDF/FTC/EFV:** tenofovir/emtricitabine/efavirenz; **ABC/3TC+LP/r:** abacavir/lamivudine+ lopinavir boosted with ritonavir; **TDF/FTC+RAL+DRV/r:** tenofovir/emtricitabine+raltegravir+ darunavir boosted with ritonavir; **TDF/FTC+DRV/r:** tenofovir/emtricitabine+ darunavir boosted with ritonavir; **AZT/3TC+LP/r:** zidovudine/lamivudine+ lopinavir boosted with ritonavir; **TDF/FTC+RAL+DTG:** tenofovir/emtricitabine+ raltegravir+ dolutegravir; **TDF/FTC+LP/r:** tenofovir/emtricitabine+ lopinavir boosted with ritonavir; **ABC/3TC+EFV:** abacavir/lamivudine+ efavirenz; **TDF/FTC+DRV/r+ATV/r:** tenofovir/emtricitabine+ darunavir and atazanavir boosted with ritonavir.



Quality assurance, mixture rate, and HIV-1 subtyping analysis

Forty-two plasma samples were analyzed, with 97.6% (41/42) successfully sequenced for at least one region of the PR-INT-RT genes. However, two samples (4.76%) amplified only the RT-PR gene, while one (2.38%) amplified only the INT gene. No insertions or deletions were detected. Two stop codons were identified in two samples (RT_188: TAG and INT_Q168). Of the HIV-1 sequences, 78.57% were classified as subtype B and 16.66% as non-B subtypes, specifically circulating recombinant forms (CRF) from the A, B, and G subtypes (Table 2). A more than 1% mixture rate was observed in 26.1% (11/42) of the samples.

TABLE 2. HIV genotyping in ART-naïve and experienced patients from a healthcare center in Quito.

Genotypes(n=42)	n	%
B	33	78.57
CRF02_AG	5	11.9
CRF24_BG	1	2.38
CRF19_cxp	1	2.38

Abbreviations: CRF02_AG: circulating recombinant form 02_AG; CRF24_BG: circulating recombinant form 24_BG; CRF19_cxp: circulating recombinant form 19_cxp (subtypes D, A1 and G)

Surveillance, major, and accessory DRMs and polymorphisms in RT-PR and INT genes

All 42 samples contained at least one polymorphism, and 42 potential drug resistance mutations (DRMs) were identified. Of these, 38.6% were linked to protease inhibitors (PIs), 34.09% to NNRTIs/NRTIs, and 22.7% to INSTIs. However, only 30.9% (13/42) of these DRMs were classified as major, minor, or accessory mutations with a potential impact on ART susceptibility, while the role of 7.13% (3/42) remains unknown. The overall prevalence of DRMs was 9.52%, primarily associated with potential resistance to NNRTIs. All identified mutations and interpretations are detailed in Tables 2, 3, 4.

NRTI mutations

Neither surveillance drug resistance mutations (SDRMs) nor major drug resistance mutations were identified for NRTIs or thymidine analog mutations (TAMs). Most of the mutations were classified as minor or accessory. Notably, the polymorphic mutation S68G was observed in 14.28% (6/42) of the samples: four corresponded to the B subtype and two to the CRF02_AG.

NNRTI mutations

The major surveillance drug resistance mutation (SDRM) K103N and the non-polymorphic F227C mutation in one B subtype sample were identified. Additionally, several minor or accessory mutations were found: V179E/D (7.14%) in three subtype B samples, E138A (2.38%), V108I (2.38%), and V106I (2.38%) in three different B subtype samples. Another polymorphic RT mutation, V118I (7.14%), was observed in three B subtype samples. The rest of the mutations are described in Table 4.



PI mutations

M46L was the only major surveillance drug resistance mutation (SDRM) identified in a subtype B sample. Additionally, the most prevalent PI accessory mutations were as follows: A71V (26.19%), K20R (4.76%), L10I (4.76%), K43T (2.38%), and A71T (2.38%); as well as the consensus mutations for the for CRF02_AG subtype V82I (16.66%), K20I (11.90%), T34S (2.38%), and V11V1 (2.38%) (Table 3).

INSTI mutations

No major mutations were identified for INSTIs. The accessory mutations E157Q (7.14%) and L74M (4.76%) were identified in three subtype B samples and two subtype CRF02_AG samples, respectively. Additionally, other highly polymorphic mutations such as M50I (28.57%) in B subtype samples, L74I (14.28%) in five B subtype and one CRF02_AG samples, E138D (4.76%) in two B subtype samples, S119R (2.38%), and S230N (2.38%) were observed. Unusual mutations, including H183L (2.38%), L194LF (2.38%), C65CY (2.38%), L234Y (2.38%), and V75A (2.38%), were identified in three B subtype samples, and the APOBEC mutation R224RQ (2.38%) in one CRF02_AG sample was also detected, as detailed in Table 5.

TABLE 3. Mutations and frequency in PI gene in naïve and experienced HIV patients attending a clinic in Quito.

Mutation	n	Frequency (%)
PI		
M16L	1	2.38
ACCESSORY		
K47T	1	2.38
OTHERS		
A71V	9	21.43
V82I	6	14.29
A71T	5	11.90
K20R	5	11.90
K20I	5	11.90
T74S	1	2.38
L10V	1	2.38
L10LI	1	2.38
L33I	1	2.38
V82VI	1	2.38
L10I	5	11.90
A71AIV	1	2.38
L33V	1	2.38
L10IV	1	2.38
V11V1	1	2.38

TABLE 4. Mutations and frequency in RT gene in naïve and experienced HIV patients attending a clinic in Quito.

Mutation	n	Frequency (%)
RT		
NNRT		
V179E	2	4.76
E138A	1	2.38
K103KN	1	2.38
F227C	1	2.38
V108I	1	2.38
V179D	1	2.38
V106I	1	2.38
NRTI		
S68G	6	14.29
T39TA	1	2.38
OTHERS		
K101K	1	2.38
T69N	1	2.38
V118I	3	7.14
V179I	3	7.14
V90VI	1	2.38
Y188*	1	2.38

TABLE 5. Mutations and frequency in IN gene in naïve and experienced HIV patients attending a clinic in Quito.

IN	n	Frequency (%)
ACCESSORY		
E157Q	3	7.14
L74M	2	4.76
OTHERS		
S230N	4	9.52
M50I	11	26.19
L74I	8	19.05
E138D	1	2.38
H183HL	1	2.38
L104LF	1	2.38
C65CY	1	2.38
L234Y	1	2.38

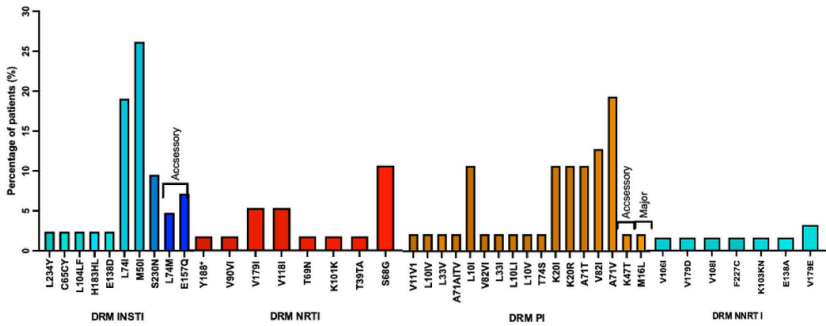


FIGURE 1. Mutation frequencies of HIV-1 for INSTI, PI, NNRTI, and NRTI based on Stanford database (HIVdb) identification in naïve and experienced HIV patients attending a healthcare center in Quito. On the X axis are the mutations for each HIV viral protein, and on the Y axis is the frequency of the identified HIV mutations. Light blue and blue represent accessory mutations for the INT gene, red is the NRTI mutations of the RT gene, brown and light brown are the mutations of the PI gene, and turquoise is the NRTI mutation of the RT gene.

Prediction of ART susceptibility

Of the 13 identified drug resistance mutations (DRMs), 30.76% (4/13) were either not predicted to impact ART susceptibility or were considered polymorphisms according to the Stanford University algorithm (score below 9). For NNRTI, S68G was identified in four ART-experienced patients on DTG, ATV/r, and EFV-based regimens, and T397A in one ART-experienced patient on a DTG regimen. For INSTIs, L74M (4.76%) was found in two patients under DTG and RAL regimens, while K43T was in one treatment-naïve patient on an EFV-based regimen.

Potential low-level resistance (PLLR)

Of the drug resistance mutations (DRMs) analyzed, 53.8% (7/13) were associated with a prediction of potential low-level resistance (PLLR) to NNRTIs (score ranging from 10 to 14). The V179E/D mutation (7.14%) was identified in two ART-naïve patients receiving an FTC/EFV regimen and one ART-experienced patient on a TDF/FTC+RAL regimen. The E138A mutation (2.38%) was detected in one ART-experienced patient on TDF/FTC+RAL, while the V108I (2.38%) and V106I mutations were observed in two ART-naïve patients on DRV/r and TDF/FTC/EFV regimens, respectively. Furthermore, the presence of the E157Q mutation predicted PLLR for INSTIs in two ART-naïve patients on RAL and EFV regimens and in one ART-experienced patient on LP/r. For protease inhibitors (PIs), only the SDRM M46L mutation was identified in one ART-naïve patient on an EFV-based regimen.

Low-level, intermediate, and higher resistance (LLR, INTR, and HR)

Among NNRTIs (15.38%), the previously mentioned V108I mutation was associated with low-level resistance (LLR) (score 15-29) to Rilpivirine (RPV) and was observed in the same previous patient. The surveillance drug resistance mutation (SDRM) K103N was identified in an ART-experienced patient with low adherence to a TDF/FTC/EFV regimen, conferring high-level resistance (HLR) (score >60) to Nevirapine (NVP), Efavirenz (EFV), and Doravirine (DOR). Additionally, the F227C mutation was identified in this patient,



and it is associated with intermediate resistance (INTR) (score 30-59) to RPV and Etravirine (ETR). A detailed susceptibility prediction of these drug resistance mutations (DRMs) is provided in Table 6.

TABLE 6. Interpretation of DRM identified in samples from naïve and experienced HIV patients for NRTI, NNRTI, INSTI, and PI

Type of ART	Mutation	Interpretation*
NRTI	S68G	Susceptible to ABC, AZT, FTC, 3TC and TDF
	T39TA	
INSTI	L74M	Susceptible to BIC, CAB, RAL, DTG, and EVG
	E157Q	
PI	K43T	Susceptible to ATV/r, LPV/r and DRV/r
	M46L	
NNRTI	K103KN	HLR to NVP, EFV and DOR
	F227C	INTR to RPV and ETR
	V108I	PLL: DOR, EFV/LLR to NVP
	E138A	PLL to ETR and LLR to RVP
	V179D/E	PLL to EFV, ETR, NVP and RPV
	V106I	PLL to DOR, ETR, NVP and RPV

* Only LLR, INT, and HLR are considered for the prevalence calculation. PLLR are not considered.

Abbreviations: **ATV/r:** atazanavir boosted with ritonavir; **ABC:** abacavir; **AZT:** zidovudine; **BIC:** bictegravir; **CAB:** cabotegravir; **DOR:** doravirine; **DRV/r:** darunavir boosted with ritonavir; **DTG:** dolutegravir; **EFV:** efavirenz; **ETR:** etravirine; **EVG:** elvitegravir; **FTC:** emtricitabine; **HLR:** high-level resistance; **INSTI:** integrase strand transfer inhibitors; **INTR:** intermediate resistance; **LLR:** low-level resistance; **LPV/r:** lopinavir boosted with ritonavir; **NRTI:** nucleoside reverse transcriptase inhibitors; **NNRTI:** non-nucleoside reverse transcriptase inhibitors; **NVP:** nevirapine; **PI:** protease inhibitors; **PLL:** potential low-level resistance; **RAL:** raltegravir; **RVP:** rilpivirine; **3TC:** lamivudine; **TDF:** tenofovir.

DISCUSSION

In this study, we described the presence of HIV-1 drug resistance mutations (DRMs) at a healthcare center in Quito, Ecuador, along with the circulating subtypes and their potential impact on various ART regimens over two different years. To our knowledge, this is the most recent study in Ecuador to report on the prevalence of HIV DRMs across different drug classes (NNRTIs, NRTIs, PIs, and INSTIs) before and during the transition to DTG-based regimens. We identified an overall DRM prevalence of 9.52% associated with low-level, intermediate, and high resistance prediction to the different available ART regimens. Most were primarily associated with NNRTIs, while none were detected for INSTI drugs. According to a recent meta-analysis, the worldwide prevalence of resistance to NNRTIs is 26.31% (95% CI, 20.76–32.25) [21].

Subtype B is the most prevalent HIV-1 subtype in Western and Central Europe, North America, Latin America, and the Caribbean, accounting for 60.5% of cases in these regions [8]. In the Andean region, the prevalence can reach up to 99% [22]. In our study,



subtype B was detected in 78.57% of the samples, aligning with previous reports from Ecuador [23]. Circulating Recombinant Forms (CRFs) are considered HIV-1 strains that result from the recombination of different HIV subtypes and represent approximately 29% of HIV infections worldwide [24]. Among these, CRF02_AG was identified in 11.9% of our samples, confirmed by the presence of the K20I signature mutation in the PR gene [20]. This form has a global prevalence of 7%, while Latin America is less common, with a prevalence of 0.9% [8] (World Health Organization, 2021). A previous Ecuadorian study reported a 4% prevalence of CRF02_AG in antiretroviral therapy (ART) treated patients during 2018 [23].

CRF19_cxp and CRF24_BG, recombinant forms of subtypes D-A and B-G, respectively, were previously reported in countries like Cuba and Spain but had not been documented in Ecuador [25,26]. These CRFs are particularly significant due to their association with rapid disease progression to AIDS. In our study, both CRFs were identified, with one case found in an ART-experienced patient from Cuba who exhibited persistent low-level viremia. Migration is known to play a critical role in the introduction and spread of HIV subtypes [24]; Ecuador has experienced significant migration from countries such as Cuba, Spain, and Venezuela in recent decades, likely explaining the detection of these CRFs in our population. However, the specific impact of these recombinant forms on HIV-1 transmission dynamics and ART resistance in Ecuador requires further investigation.

Despite this, our study has several limitations. First, the small sample size was due to resource constraints and did not include other national healthcare centers; this may lead to significant variations in our findings compared to national estimations. Geographic variability and selection bias are also concerns; although there is a significant proportion of HIV cases in Quito-Pichincha (19.56%), other provinces such as Guayas (75%), Manabí (8.46%), and Esmeraldas (4.86%) have reported higher prevalence rates in Ecuador [27]. These findings indicate that the prevalence of circulating mutations warrants further attention. In recent years, next-generation sequencing (NGS) technologies have significantly enhanced the accurate identification of drug resistance mutations (DRMs) compared to traditional Sanger sequencing, which only detects variants with DRMs at levels exceeding 20% of the viral population across various samples. This limitation of the Sanger method may help to explain the low prevalence of DRMs observed in our study. Despite this, Sanger sequencing is still recommended as the standard method for HIV DRM surveillance by the World Health Organization (WHO) [16]. Additionally, patient adherence to antiretroviral therapy (ART) and the transition to dolutegravir (DTG)-based regimens may not fully reflect DRM trends from previous years, potentially introducing further limitations to our analysis.

In 2023, the Pan-American Health Organization (PAHO) reported that 1.7 million people who live with HIV (PLHIV) were receiving ART with a treatment coverage of 73% for the Americas and the Caribbean [28]. While a definitive cure has not yet been found, ART has significantly improved the quality of life and life expectancy of HIV patients through long-term viral suppression and reducing clinical symptoms and complications. During the same year, in Ecuador, at least 85% of PLHIVs knew their status and were under an ART regimen [27], remarking the continuous efforts to improve and reach the established goals for 2030. However, at least 36% of patients under ART could not reach viral suppression (less than 1,000 copies/mL), increasing the risk of treatment failure and drug resistance.



The emergence of antiretroviral therapy (ART) resistance in recent decades has significantly compromised the benefits of treatment, particularly for the most widely used regimens. Determining and characterizing patterns of HIV-1 drug resistance mutations (DRMs) and polymorphisms is crucial for understanding viral transmission dynamics, adaptation, and resistance to current antiretroviral therapy (ART) regimens. This knowledge aids in developing accurate interventions. It is well-established that resistance to NNRTIs, such as nevirapine (NVP) or efavirenz (EFV), is the most common and can develop in at least 10% of ART-naïve patients receiving these drugs as first-line therapy (ranging from 9-14% depending on the country), with this rate tripling in ART-experienced patients [12]. According to the WHO 2021 [8], the overall prevalence of pre-treatment drug resistance (PDR) for NNRTIs in countries such as Colombia, Argentina, Brazil, Mexico, and Cuba ranges from 6 to 22% [9,28,29] and in neighboring countries like Peru, the prevalence of pre-treatment drug resistance in 2021 was reported at 9.8% [30]. This is consistent with our study, which identified a prevalence of 9.52% for NNRTIs, and half of them were considered as transmitted, reflecting the widespread use of EFV-based regimens as first-line regimens before 2021. Furthermore, a previous study conducted in Latin America reported a prevalence of drug resistance in a limited number of samples from Ecuador during 2012, which was 4.3%, suggesting the progressive increase of DRMs over the years [23].

In our study, half of the NNRTI resistance mutations (DRMs) were classified as transmitted, primarily consisting of minor, accessory, or polymorphic mutations with minimal impact on ART susceptibility. One such mutation is V108I. It was detected in a treatment-naïve patient on a darunavir/ritonavir (DRV/r) regimen. This mutation, selected by most NNRTIs, contributes to reduced susceptibility only when combined with other DRMs, leading to low-level resistance (LLR) to nevirapine (NVP), potential low-level resistance (PLLR) to efavirenz (EFV), and etravirine (DOR) [31]. This mutation has been reported in 50% of drug resistance mutations (DRMs) in Argentina but shows a lower prevalence in Mexico and Colombia (<5%) [8,20,32]. In our study, it was observed in 2.38% of cases. Also, the E138A mutation was identified in one treatment-naïve patient under an INSTI-based regimen. It could be found in 2-5% of treatment-naïve patients under rilpivirine (RPV) and etravirine (ETR) regimens, with prevalence varying by subtype and region. This mutation confers potential low-level resistance (PLLR) to ETR and low-level resistance (LLR) to RPV but does not significantly impact ART efficacy [8,20,33,34].

In contrast, protease inhibitors (PIs) and integrase strand transfer inhibitors (INSTIs) exhibit lower resistance rates due to their higher genetic barrier. Nonetheless, their frequent use and viral characteristics still impact their effectiveness. Resistance rates for PIs ranged from 0.1-1.4%, and for INSTIs, available data showed rates of 7.6% for Argentina and 0.5% for Mexico [8]. For PIs, one important DRM was found in an ART-naïve patient under an NRTI-based regimen. The M46L mutation is classified as a surveillance DRM (SDRM). It can occur in various HIV-1 subtypes among both ART-experienced or naïve patients, with a reported prevalence of 0.37% in subtype B samples. M46L impacts the structural integrity of the enzyme binding site, conferring resistance to indinavir, nelfinavir, and saquinavir [35,36,37]. It has been documented in multiple countries, including the United States, Argentina, Brazil, Peru, Spain, and Cuba [12,38]. For our study, the prevalence of PI drug resistance was 2.38%.



No major DRMs were identified for INSTIs; however, minor accessory mutations like E157Q were found in two ART-naïve patients receiving RAL and efavirenz EFV regimens, as well as in one ART-experienced patient on an LP/r regimen. The E157Q mutation occurs in 1-5% of INSTI-naïve patients and has a minimal impact on susceptibility to RAL, EVG, or DTG when combined with other mutations [39]. It has been reported in African studies with a prevalence of 1.56% [40]. Additionally, L74M is a common polymorphic mutation found in 1-5% of naïve patients, especially in the CRF02_AG subtype. It was found in two naïve patients on RAL and DTG-based regimens, though it did not affect susceptibility.

The low prevalence of DRMs for PIs and INSTI regimens in the present study would be explained by their less frequent use as first-line regimens during 2019-2021 in Ecuador. It could also be attributed to several factors, including high viral suppression rates, good treatment adherence, limited ART exposure, and the geographical and epidemiological characteristics of ART-naïve patients in Quito. Other potential explanations include the small sample size or the recent introduction of highly effective dolutegravir (DTG)-based regimens. Similar findings have been reported in previous studies from Sweden, Iceland, China, and the U.S., where low levels of transmitted DRMs have been associated with strong ART adherence and near-complete viral suppression, particularly concerning NRTIs, PIs, and INSTIs [41,42,43]. This suggests that the widespread use of potent regimens and comprehensive treatment strategies may continue to play a key role in reducing transmitted drug resistance across various populations [41,43,44,45].

In 2018, the WHO recommended the inclusion of DTG in first-line regimens, highlighting the need for strategies to prevent HIV drug resistance and the transmission of viral populations carrying associated mutations [46]. It reported high levels of HIV viral load suppression (>90%) in populations receiving dolutegravir (DTG)-based antiretroviral therapy as a first-line regimen. According to PAHO data, Ecuador is one of the countries where more than 80% of PLWH currently receive a DTG-based regimen [46]. Still, from 2020, the DTG switch was performed according to international guidelines as a first-line treatment [47]. During our study, this transition was under implementation, finding that 48% of patients received an EFV and 24.1% DTG regimens. However, no national surveillance studies evaluate the direct impact of DRMs and their clinical response when EFV and DTG regimens are used [27].

On the other hand, acquired drug resistance mutations (ADRs) are typically observed in ART-experienced patients, where certain viral populations develop resistance under drug-selective pressure, often leading to a virological failure (VF) [47]. These mutations are frequently associated with NNRTI regimens, with a prevalence of approximately 27%, and in some African countries, this can rise to as high as 50% [48,49]. A 2018 study conducted in Ecuador involving 101 HIV-positive adults and children with VF found a prevalence of ADRs of 34.9% [23]. In contrast, our study observed a lower ADR prevalence of 4.74%, which may reflect a lower proportion of patients experiencing VF in the healthcare center. However, this could be different on a national scale.

The most common acquired drug resistance (ADR) mutation to NNRTIs is K103N. It was identified in an HIV-1 subtype B sample from a low-adherent, ART-experienced patient. K103N is considered a surveillance drug resistance mutation (SDRM), occurring in approximately 1.15% of treatment-naïve patients and up to 37.11% of ART-experienced



patients. This mutation alters the binding site of NNRTIs to the reverse transcriptase (RT) enzyme, significantly reducing the efficacy of NNRTIs like efavirenz (EFV) and nevirapine (NVP), with a 20- to 50-fold decrease in susceptibility. However, the presence of K103N does not impact other NNRTIs [20]. The importance of this mutation was noted in one meta-analysis performed in Latin America [28]. Another study suggested that this mutation may cause reduced viral suppression in patients under dolutegravir (DTG)-based regimens, particularly in South African populations, raising concerns about the potential for multi-class drug resistance [50]. This underscores the importance of continuous surveillance and tailored ART regimens to prevent treatment failure in the presence of specific mutations.

F277C is a non-polymorphic mutation selected in persons receiving DOR and rarely in persons receiving ETR and RPV. It usually occurs in combination with other DRMs and, in this setting, has been related to the high level of resistance for DOR. The mutation is traditionally associated with moderate to high-level reductions in susceptibility to NNRTIs such as nevirapine (NVP), efavirenz (EFV), etravirine (ETR), and rilpivirine (RPV). In the earlier study from Ecuador by [23], this ADR mutation was not reported. In our findings, the F277C mutation was identified in a single subtype B sample from an ART-experienced patient on an EFV regimen, but it did not result in any significant reduction in susceptibility to NNRTIs.

Although INSTI drugs have a high genetic barrier, a concerning increase in acquired drug resistance has been reported in some countries. One study performed in Mexico in 2020 identified a cross-resistance between different drugs of this group and VF to raltegravir and a lower proportion to dolutegravir [51]. In Sudan, DTG drug resistance mutations have been observed at a prevalence of less than 0.2% (95 % CI: 0.0-1.2 %); however, acquired drug resistance (ADR) surveys suggest that resistance rates to DTG may be below 3 % globally, though in low- and middle-income countries, prevalence can reach 4.8 %, and in certain African countries, it can rise as high as 19.6% [12]. Given these concerns, the WHO recommends routine drug resistance surveillance as the global use of DTG-based regimens expands [12].

In conclusion, our findings indicate that the prevalence of drug resistance mutations (DRMs) among the studied population is low, and most of these mutations do not significantly compromise susceptibility to key antiretroviral drug classes, including INSTIs, NRTIs, and PIs. However, some non-nucleoside reverse transcriptase inhibitor (NNRTIs) mutations could produce PLLR to LLR. The clinical impact of these results should be evaluated based on individualized responses to ART. Finally, it is important to highlight the potential role of viral mutations classified as polymorphisms. Although they are often not associated with resistance, it has been observed that they could contribute to resistance in the context of cumulative mutations or when they occur in certain HIV subtypes [52].

Our results also suggest that, given the low prevalence of DRMs, maintaining current ART regimens is a viable option. However, further studies are required to assess this approach nationally. Since HIV-1 DRM testing is not yet mandatory for treatment-naïve or experienced patients in many settings, implementing routine surveillance and follow-up of drug resistance is crucial. Countries like Brazil, Mexico, Argentina,



Peru, and Honduras form part of the WHO HIVResNET for drug resistance, enhancing their responsiveness in the control and prevention of HIV transmission; although the economic resources required vary, Ecuador should consider its implementation as a public policy. Additionally, understanding the impact of switching to dolutegravir (DTG)-based regimens when necessary will ensure long-term treatment success.

ACKNOWLEDGMENTS

To Doctor Santiago Ávila and Claudia García from the Laboratory of Virological Diagnosis at the Center for Research in Infectious Diseases in the Instituto Nacional de Enfermedades Respiratorias "Ismael Cosío Villegas" in Mexico City for their kind support in performing some of the analyses.

AUTHOR CONTRIBUTION STATEMENT

The authors confirm the contribution to the paper as follows: study conception and design: E. Teran, P. Quirola; data collection: P. Quirola, N. Cevallos; analysis and interpretation of results: P. Quirola, P. Espinosa; draft manuscript preparation: P. Quirola, E. Teran. All authors reviewed the results and approved the final version of the manuscript. Some sentences were improved using ChatGPT.

DECLARATION OF INTERESTS

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have influenced the work reported in this paper.

REFERENCES

- [1] World Health Organization. (n.d.). *HIV and AIDS*. Retrieved July 30, 2023, from <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/hiv-aids>
- [2] World Health Organization. (n.d.). *Global HIV Programme*. Retrieved July 30, 2023, from <https://www.who.int/teams/global-hiv-hepatitis-and-stis-programmes/hiv/treatment/chronic-comorbidities-and-coinfections>
- [3] World Health Organization. (2021). *Consolidated guidelines on HIV prevention, testing, treatment, service delivery and monitoring: Recommendations for a public health approach*. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240031593>
- [4] UNAIDS. (n.d.). *AIDS Targets: 2025 Target setting and 2020-2030 resource needs and impact estimation*. Retrieved July 30, 2023, from https://unaids.org/en/topics/2025_target_setting
- [5] Nimwesiga, C., Taremwa, I. M., Nakanjako, D., & Nasuuna, E. (2023). Factors Associated with Retention in HIV Care Among HIV-Positive Adolescents in Public Antiretroviral Therapy Clinics in Ibanda District, Rural South Western Uganda. *HIV/AIDS (Auckland, N.Z.)*, 15, 71. <https://doi.org/10.2147/HIV.S401611>
- [6] Messeri, P., Yomogida, M., Ferat, R. M., Garr, L., & Wirth, D. (2020). An HIV health plan patient navigation program: Engaging HIV positive individuals in primary medical care. *Journal of HIV/AIDS and Social Services*, 19(1), 55–73. <https://doi.org/10.1080/15381501.2019.1699485>
- [7] Suñé, C., Brennan, L., Stover, D. R., & Klimkait, T. (2004). Effect of polymorphisms on the replicative capacity of protease inhibitor-resistant HIV-1 variants under drug pressure. *Clinical Microbiology and Infection*, 10(2). <https://doi.org/10.1111/j.1469-0691.2004.00832.x>
- [8] World Health Organization-WHO. (2021). *HIV Drug Resistance Report 2021*. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240038608>
- [9] World Health Organization. (n.d.-a). *Fact Sheet: HIV Drug Resistance*. Retrieved July 30, 2023, from <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/hiv-drug-resistance>
- [10] Owens, D. K., Davidson, K. W., Krist, A. H., Barry, M. J., Cabana, M., Caughey, A. B., Curry, S. J., Doubeni, C. A., Epling, J. W., Kubik, M., Landefeld, C. S., Mangione, C. M., Pbert, L., Silverstein, M., Simon, M. A., Tseng, C. W., & Wong, J. B. (2019). Screening for HIV Infection: US Preventive Services Task Force Recommendation Statement. *JAMA*, 321(23), 2326–2336. <https://doi.org/10.1001/JAMA.2019.6587>
- [11] Wensing, A. M., Calvez, V., Ceccherini-Silberstein, F., Charpentier, C., Günthard, H. F., Paredes, R., Shafer, R. W., & Richman, D. D. (2022). 2022 update of the drug resistance mutations in HIV-1. *Topics in Antiviral Medicine*, 30(4). <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/36375130/>
- [12] Global HIV, H. and Sti. P. (HHS). (2024). WHO Brief Report on HIV Drug Resistance 2024. *World Health Organization (WHO)*. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240086319>
- [13] Ministerio de Salud Pública del Ecuador. (2017). *Informe GAM Ecuador. Monitoreo Global del SIDA*.
- [14] Ministerio de Salud Pública del Ecuador. (n.d.). *Prevención, diagnóstico y tratamiento de la infección por el virus de la inmunodeficiencia humana (VIH) en embarazadas, niño, adolescentes y adultos 2019*. Retrieved April 6, 2024, from <https://www.salud.gob.ec/b-guias-de-practica-clinica-publicadas/>
- [15] World Health Organization. (2010). WHO Guidelines on Drawing Blood. *World Health Organization*, 1–109. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK138650/>
- [16] World Health Organization (WHO). (2020). WHO HIVResNet HIV drug resistance laboratory operational framework, second edition. September, 180–199.
- [17] García-Morales, C., Tapia-Trejo, D., Quiroz-Morales, V. S., Navarro-Álvarez, S., Barrera-Arellano, C. A., Casillas-Rodríguez, J., Romero-Mora, K. A., Gómez-Palacio-Schjetnan, M., Murakami-Ogasawara, A., Ávila-Ríos, S., Reyes-Terán, G., Hernández-Juan, R., Rodríguez-Aguirre, E. H., Prado-Galbarro, F. J., Rivera-Benítez, C., Sierra-Madero, J., Alanís-Vega, A., Carrillo-Martínez, H., Centeno, J. L., ... Armenta, L. A. (2017). HIV pretreatment drug resistance trends in three geographic areas of Mexico. *Journal of Antimicrobial Chemotherapy*, 72(11), 3149–3158. <https://doi.org/10.1093/JAC/DKX281>
- [18] Recall. (n.d.). Retrieved August 3, 2023, from https://recall.bccfe.ca/account/register?_method=post&login=&password=&submit=Register+for+a+New+Account+



- [19] Siepel, A. C., Halpern, A. L., Macken, C., & Korber, B. T. M. (2009). A computer program designed to screen rapidly for HIV type 1 intersubtype recombinant sequences. *AIDS Research and Human Retroviruses*, 11(11), 1413–1416. <https://doi.org/10.1089/AID.1995.11.1413>
- [20] Stanford HIVDB data base. (n.d.). Pattern Analysis Report. Retrieved September 6, 2024, from <https://hivdb.stanford.edu/hivdb/by-patterns/report/?mutations=PR%3AK43T&name=PR%3AK43T>
- [21] Ge, L., Luo, Y., Li, X., Hu, Y., Sun, L., Bu, F., Shan, D., & Liu, J. (2024). Global, regional, and national prevalence of HIV-1 drug resistance in treatment-naïve and treatment-experienced children and adolescents: a systematic review and meta-analysis. *EClinicalMedicine*, 77. <https://doi.org/10.1016/J.ECLINM.2024.102859>
- [22] Pineda-Peña, A.-C., Bello, D.-C., Sussmann, O., Vandamme, A.-M., Vercauteren, J., & van Laethem, K. (2012). HIV-1 Transmitted Drug Resistance in Latin America and the Caribbean: What Do We Know? *Aids Reviews*, 14(4), 256–67.
- [23] González-González, M., Correa-Sierra, C., Hermida-Álava, K., Machado-Díaz, A., Gómez-Andrade, L. F., Castillo-Segovia, M., Pérez-Santos, C. L., & Kouri-Cardellá, V. (2018). Genetic analysis of the mutations in HIV-1 infected population in Ecuador. *Revista Chilena de Infectología*, 35(1), 49–61. <https://doi.org/10.4067/S0716-10182018000100049>
- [24] Williams, A., Menon, S., Crowe, M., Agarwal, N., Bicler, J., Bbosa, N., Ssemwanga, D., Adungo, F., Moecklinghoff, C., Macartney, M., & Oriol-Mathieu, V. (2023). Geographic and Population Distributions of Human Immunodeficiency Virus (HIV)-1 and HIV-2 Circulating Subtypes: A Systematic Literature Review and Meta-analysis (2010–2021). *The Journal of Infectious Diseases*, 228(11), 1583. <https://doi.org/10.1093/INFDIS/JIAD327>
- [25] Beamud, B., Bracho, M. A., & González-Candelas, F. (2019). Characterization of new recombinant forms of HIV-1 from the comunitat Valenciana (Spain) by phylogenetic incongruence. *Frontiers in Microbiology*, 10(MAY). <https://doi.org/10.3389/FMICB.2019.01006/PDF>
- [26] Kouri, V., Khouri, R., Alemán, Y., Abrahantes, Y., Vercauteren, J., Pineda-Peña, A. C., Theys, K., Megens, S., Moutschen, M., Pfeifer, N., Van Weyenbergh, J., Pérez, A. B., Pérez, J., Pérez, L., Van Laethem, K., & Vandamme, A. M. (2015). CRF19_cpx is an Evolutionary fit HIV-1 Variant Strongly Associated With Rapid Progression to AIDS in Cuba. *EBioMedicine*, 2(3), 244. <https://doi.org/10.1016/J.EBIOM.2015.01.015>
- [27] Ministerio de Salud Pública del Ecuador. (2024) *Informe Anual de la Situación Epidemiológica del VIH, Ecuador 2022*. https://www.salud.gob.ec/wp-content/uploads/2024/04/INFORME-ANUAL-DE-VIH-2022_MSP.pdf
- [28] Avila-Rios, S., Sued, O., Rhee, S. Y., Shafer, R. W., Reyes-Teran, G., & Ravasi, G. (2016). Surveillance of HIV Transmitted Drug Resistance in Latin America and the Caribbean: A Systematic Review and Meta-Analysis. *PLoS ONE*, 11(6). <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0158560>
- [29] Montano, S. M., Sanchez, J. L., Laguna-Torres, A., Cuchi, P., Avila, M. M., Weissenbacher, M., Serra, M., Viñoles, J., Russi, J. C., Aguayo, N., Galeano, A. H., Gianella, A., Andrade, R., Arredondo, A., Ramirez, E., Acosta, M. E., Alava, A., Montoya, O., Guevara, A., ... Carr, J. K. (2005). Prevalences, genotypes, and risk factors for HIV transmission in South America. *Journal of Acquired Immune Deficiency Syndromes*, 40(1), 57–64. <https://doi.org/10.1097/01.QAI.0000159667.72584.88>
- [30] Yabar, C. A., Vilcarino, G. F., Espetia, S., Yaya, M. G., Salinas, G., García-Fernández, L., Vásquez Becerra, R. D., Benites, C., Santos-Anaya, D., Mamani, E., Acuña, M., Romero, S., & Cárdenas, F. (2021). Transmitted resistance in HIV-1 of patients from nine departments of Peru. *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Publica*, 38(1), 77–82. <https://doi.org/10.17843/RPMESP.2021.381.5527>
- [31] Iyidogan, P., & Anderson, K. S. (2014). Current perspectives on HIV-1 antiretroviral drug resistance. *Viruses*, 6(10), 4095. <https://doi.org/10.3390/v6104095>
- [32] Melikian, G. L., Rhee, S. Y., Varghese, V., Porter, D., White, K., Taylor, J., Townner, W., Troia, P., Burack, J., DeJesus, E., Robbins, G. K., Razzeca, K., Kagan, R., Liu, T. F., Jeffrey Fessel, W., Israelski, D., & Shafer, R. W. (2014). Non-nucleoside reverse transcriptase inhibitor (NNRTI) cross-resistance: implications for preclinical evaluation of novel NNRTIs and clinical genotypic resistance testing. *The Journal of Antimicrobial Chemotherapy*, 69(1), 12–20. <https://doi.org/10.1093/JAC/DKT316>
- [33] Tambuyzer, L., Nijs, S., Daems, B., Picchio, G., & Vingerhoets, J. (2011). Effect of mutations at position E138 in HIV-1 reverse transcriptase on phenotypic susceptibility and virologic response to etravirine. *Journal of Acquired Immune Deficiency Syndromes (1999)*, 58(1), 18–22. <https://doi.org/10.1097/QAI.0B013E3182237F74>



- [34] Tambuyzer, L., Azijn, H., Rimsky, L. T., Vingerhoets, J., Lecocq, P., Kraus, G., Picchio, G., & de Béthune, M-P. (2009). Compilation and prevalence of mutations associated with resistance to non-nucleoside reverse transcriptase inhibitors. *Sage Journals*, 14(1), 103-109. <https://doi.org/10.1177/135965350901400114>
- [35] Bennett, D. E., Camacho, R. J., Otelea, D., Kuritzkes, D. R., Fleury, H., Kiuchi, M., Heneine, W., Kantor, R., Jordan, M. R., Schapiro, J. M., Vandamme, A-M., Sandstrom, P., Boucher, C. A. B., van de Vijver, D., Rhee, S-Y, Liu, T. F., Pillay, D., & Shafer, R. W. (2009). The World Health Organization 2009 list of mutations. *HIV Drug Resistance Database*. <https://hivdb.stanford.edu/pages/WHOResistanceList.html>
- [36] Meher, B. R., & Wang, Y. (2015). Exploring the drug resistance of V32I and M46L mutant HIV-1 protease to inhibitor TMC114: flap dynamics and binding mechanism. *Journal of Molecular Graphics & Modelling*, 56, 60. <https://doi.org/10.1016/J.JMGM.2014.11.003>
- [37] Varghese, V., Mitsuya, Y., Fessel, W. J., Liu, T. F., Melikian, G. L., Katzenstein, D. A., Schiffer, C. A., Holmes, S. P., & Shafer, R. W. (2013). Prototypical Recombinant Multi-Protease-Inhibitor-Resistant Infectious Molecular Clones of Human Immunodeficiency Virus Type 1. *Antimicrobial Agents and Chemotherapy*, 57(9), 4290–4299. <https://doi.org/10.1128/AAC.00614-13>
- [38] *Surveillance of HIV-1 Transmitted Resistance - HIV Drug Resistance Database*. (2019). <https://hivdb.stanford.edu/page/surveillance-map/>
- [39] Charpentier, C., Malet, I., Andre-Garnier, E., Storto, A., Bocket, L., Amiel, C., Morand-Joubert, L., Tumiotto, C., Nguyen, T., Maillard, A., Rodallec, A., Leoz, M., Montes, B., Véronique Schneider, Plantier, J. C., Dina, J., Pallier, C., Mirand, A., Roussel, C., ... Descamps, D. (2018). Phenotypic analysis of HIV-1 E157Q integrase polymorphism and impact on virological outcome in patients initiating an integrase inhibitor-based regimen. *Journal of Antimicrobial Chemotherapy*, 73(4), 1039–1044. <https://doi.org/10.1093/JAC/DKX511>
- [40] Branda, F., Giovanetti, M., Sernicola, L., Farcomeni, S., Ciccozzi, M., Borsetti, A. (2024) Comprehensive analysis of HIV-1 integrase resistance-related mutations in African countries. *Pathogens*, 13(2), 102. <https://doi.org/10.3390/pathogens13020102>
- [41] Karlsson, A., Björkman, P., Bratt, G., Ekvall, H., Gisslén, M., Sönnernborg, A., Mild, M., & Albert, J. (2012). Low Prevalence of Transmitted Drug Resistance in Patients Newly Diagnosed with HIV-1 Infection in Sweden 2003–2010. *PLOS ONE*, 7(3), e33484. <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0033484>
- [42] Sallam, M., Şahin, G. Ö., Indriðason, H., Esbjörnsson, J., Löve, A., Widell, A., Gottfreðsson, M., & Medstrand, P. (2017). Decreasing prevalence of transmitted drug resistance among ART-naïve HIV-1-infected patients in Iceland, 1996–2012. *Infection Ecology & Epidemiology*, 7(1). <https://doi.org/10.1080/2008686.2017.1328964>
- [43] Li, L., Yuan, T., Wang, J., Fitzpatrick, T., Li, Q., Li, P., Tang, X., Xu, G., Chen, D., Liang, B., Cai, W., & Zou, H. (2020). Sex differences in HIV treatment outcomes and adherence by exposure groups among adults in Guangdong, China: A retrospective observational cohort study. *EclinicalMedicine*, 22, 100351. <https://doi.org/10.1016/J.ECLINM.2020.100351>
- [44] Li, R., Song, C., Chen, D., Li, C., Hao, Y., Zeng, H., Han, J., & Zhao, H. (2022). Prevalence of transmitted drug resistance among ART-naïve HIV-infected individuals, Beijing, 2015–2018. *Journal of Global Antimicrobial Resistance*, 28, 241–248. <https://doi.org/10.1016/J.JGAR.2022.01.017>
- [45] McClung, R. P., Oster, A. M., Ocfemia, M. C. B., Saduvala, N., Heneine, W., Johnson, J. A., & Hernandez, A. L. (2022). Transmitted Drug Resistance Among Human Immunodeficiency Virus (HIV)-1 Diagnoses in the United States, 2014–2018. *Clinical Infectious Diseases*, 74(6), 1055–1062. <https://doi.org/10.1093/CID/CIAB583>
- [46] *HIV epidemic and response in Latin America and the Caribbean. October 2022 - PAHO/WHO | Pan American Health Organization*. (n.d.). Retrieved September 27, 2024, from <https://www.paho.org/en/documents/hiv-epidemic-and-response-latin-america-and-caribbean-october-2022>
- [47] Zou, X., He, J., Zheng, J., Malmgren, R., Li, W., Wei, X., Zhang, G., & Chen, X. (2020). Prevalence of acquired drug resistance mutations in antiretroviral-experiencing subjects from 2012 to 2017 in Hunan Province of central South China. *Virology Journal*, 17(1), 1–9. <https://doi.org/10.1186/S12985-020-01311-3/TABLES/4>
- [48] Mirzaei, H., Eybpoosh, S., Mehrabi, F., Shojaei, M. R., Mirzazadeh, A., Khezri, M., Nasiri, N., & Sharifi, H. (2024). Prevalence of acquired and transmitted HIV drug resistance in Iran: a systematic review and meta-analysis. *BMC Infectious Diseases*, 24(1), 1–13. <https://doi.org/10.1186/S12879-023-08916-3/FIGURES/5>



- [49] Ismael, N., Gemusse, H., Mahumane, I., Laurindo, O., Magul, C., Baxter, C., Wilkinson, E., Hofstra, L. M., Wagar, N., Bila, D., Mabunda, N., da Silva, J., Oliveira, T. de, Raizes, E., Preiser, W., Manuel, P., Ramos, A., & Vúbil, A. (2024). HIV-1 pretreatment and acquired antiretroviral drug resistance before tenofovir/ lamivudine /dolutegravir (TLD) roll-out in Mozambique. *BMC Infectious Diseases*, 24(1), 1–9. <https://doi.org/10.1186/S12879-024-09579-4/FIGURES/3>
- [50] Siedner, M. J., Moorhouse, M. A., Simmons, B., de Oliveira, T., Lessells, R., Giandhari, J., Kemp, S. A., Chimukangara, B., Akpomimie, G., Serenata, C. M., Venter, W. D. F., Hill, A., & Gupta, R. K. (2020). Reduced efficacy of HIV-1 integrase inhibitors in patients with drug resistance mutations in reverse transcriptase. *Nature Communications* 2020 11:1, 11(1), 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-19801-x>
- [51] Orta-Resendiz, A., Rodríguez-Díaz, R. A., Angulo-Medina, L. A., Hernández-Flores, M., & Soto-Ramírez, L. E. (2020). HIV-1 acquired drug resistance to integrase inhibitors in a cohort of antiretroviral therapy multi-experienced Mexican patients failing to raltegravir: a cross-sectional study. *AIDS Research and Therapy*, 17(1), 6. <https://doi.org/10.1186/S12981-020-0262-Y>
- [52] Wainberg, M. A., & Brenner, B. G. (2012). The Impact of HIV Genetic Polymorphisms and Subtype Differences on the Occurrence of Resistance to Antiretroviral Drugs. *Molecular Biology International*, 2012(1), 256982. <https://doi.org/10.1155/2012/256982>

Biopolímeros y nanotecnología - alternativas eco-amigables circulares y sostenibles en la Recuperación Mejorada de Petróleo (RPM)

Edwars Naranjo^{1,2}, Lourdes Orejuela-Escobar^{1*}, Inés Hernández^{1,2}

¹ Universidad San Francisco de Quito USFQ Quito, Ecuador.

² Universidad de Carabobo, UC Valencia, Venezuela. Department of Chemical, Experimental Faculty of Sciences and Technology (FACYT), Valencia, Venezuela.

*Corresponding author: lorejuela@usfq.edu.ec

Biopolymers and Nanotechnology: eco-friendly and sustainable alternative in Enhanced Oil Recovery

Resumen

Los biopolímeros que son materiales naturales y biodegradables, así como las nanopartículas (NPs), surgen como alternativas prometedoras y sostenibles en la industria petrolera, optimizando la extracción de petróleo de forma rentable y amigable con el medio ambiente. Los biopolímeros, capaces de mejorar la relación de movilidad, aumentar la viscosidad del agua de inyección de 20 a 30 veces su magnitud y disminuir la permeabilidad relativa al agua en un rango de 10 a 50 % o incluso más, están surgiendo como una tendencia crítica en la recuperación mejorada de petróleo (RMP), con el potencial de reemplazar a los polímeros sintéticos convencionales. Las NPs mejoran la humectabilidad de la roca en el reservorio, bajan la tensión interfacial entre el agua inyectada y el petróleo, mejorando la movilidad y reología del petróleo y permitiendo incrementar el factor de recobro. Al seleccionar biopolímeros, NPs y nanomateriales para RMP, es esencial considerar factores como el costo, la disponibilidad y las propiedades funcionales. La metodología utilizada en esta investigación implicó una revisión sistemática de la literatura científica, abarcando un análisis crítico de los avances recientes en la investigación de biopolímeros, NPs y nanomateriales para RMP. El estudio también compara biopolímeros y polímeros sintéticos, y analiza las NPs y nanomateriales usados en RMP considerando eficiencia, costo e implicaciones ambientales. Además, esta investigación explora los aspectos económicos asociados con la utilización de biopolímeros, NPs y nanomateriales en RMP, incluidos factores de costo y posibles retornos de la inversión. La innovación continua en el uso de biopolímeros se considera el futuro de la RMP, ofreciendo una alternativa más ecológica y responsable para explotar este recurso importante. El uso de biopolímeros, NPs y nanomateriales contribuye a una industria petrolera más sostenible y cuidadosa con el medio ambiente.

Los biopolímeros, materiales naturales y biodegradables, junto con las nanopartículas (NPs) y los nanomateriales, surgen como alternativas prometedoras y sostenibles en la industria petrolera, optimizando la extracción de petróleo de manera rentable y ambientalmente amigable. Los biopolímeros pueden mejorar la relación de movilidad, aumentar la viscosidad del agua de inyección entre 20 y 30 veces y reducir la permeabilidad relativa al agua en un rango del 10 % al 50 % o más. Esto los posiciona



Licencia Creative Commons
Atribución-NoComercial 4.0



Editado por /
Edited by:
Sebastián Ponce

Recibido /
Received:
24/08/2024

Aceptado /
Accepted:
05/11/2024

Publicado en línea /
Published online:
13/06/2025



como una tendencia clave en la recuperación mejorada de petróleo (RMP), con el potencial de reemplazar a los polímeros sintéticos convencionales.

Por su parte, las NPs mejoran la humectabilidad de la roca en el reservorio y reducen la tensión interfacial entre el agua inyectada y el petróleo, lo que mejora la movilidad y la reología del crudo, permitiendo incrementar el factor de recobro. Al seleccionar biopolímeros, NPs para RMP, es esencial considerar factores como el costo, la disponibilidad y las propiedades funcionales. La metodología utilizada en esta investigación consistió en una revisión sistemática de la literatura científica, que incluyó un análisis crítico de los avances recientes en la aplicación de estos materiales en RMP. Además, el estudio compara biopolímeros con polímeros sintéticos y evalúa el uso de NPs y nanomateriales en función de su eficiencia, costo e impacto ambiental.

Asimismo, esta investigación analiza los aspectos económicos asociados con la aplicación de biopolímeros, NPs y nanomateriales en RMP, considerando costos y posibles retornos de inversión. La innovación continua en el uso de biopolímeros se perfila como el futuro de la RMP, ofreciendo una alternativa más ecológica y responsable para la explotación de este recurso.

El empleo de biopolímeros, NPs y nanomateriales contribuye a una industria petrolera más sostenible y comprometida con la protección del medio ambiente.

Palabras clave: biopolímeros, recuperación mejorada de petróleo (RMP), copolimerización, nanocompuestos e hidrogeles.

Abstract

Biopolymers, natural and biodegradable materials, as well as nanoparticles (NPs) and nanomaterials emerge as promising and sustainable alternatives in the oil industry, optimizing oil extraction in a profitable and environmentally friendly way. Biopolymers, capable of improving the mobility ratio, increasing the viscosity of injection water by 20 to 30 times its magnitude and decreasing its magnitude and decreasing the relative permeability to water in the range of 10 to 50 % or even more, are emerging as a critical trend in Enhanced Oil Recovery (EOR), with the potential to replace conventional synthetic polymers. When selecting biopolymers, NPs, and nanomaterials for EOR, it is essential to consider factors such as cost, availability, and functional properties. The methodology used in this research involved a systematic review of scientific literature, encompassing a critical analysis of recent advances in biopolymer, NPs research for EOR. This study also compares biopolymers and synthetic polymers, considering efficiency, cost, and environmental implications. Additionally, the research explores the economic considerations associated with utilizing biopolymers, NPs, and nanomaterials in EOR, including cost factors and potential returns on investment. Continuous innovation in using biopolymers is seen as the future of EOR, offering a more ecological and responsible alternative to exploit this important resource. The choice of biopolymers, NPs, contributes to a more sustainable and environmentally conscious oil industry.

Biopolymers, which are natural and biodegradable materials, along with nanoparticles (NPs), emerge as promising and sustainable alternatives in the oil industry, optimizing



oil extraction in a cost-effective and environmentally friendly manner. Biopolymers can enhance the mobility ratio, increase the viscosity of injection water by 20 to 30 times, and reduce the relative permeability to water by 10 % to 50 % or more. This positions them as a key trend in enhanced oil recovery (EOR), with the potential to replace conventional synthetic polymers.

NPs, on the other hand, improve the wettability of reservoir rock and reduce the interfacial tension between injected water and oil, enhancing oil mobility and rheology, thereby increasing the recovery factor. When selecting biopolymers, NPs for EOR, it is essential to consider factors such as cost, availability, and functional properties. The methodology used in this research consisted of a systematic review of scientific literature, including a critical analysis of recent advances in the application of these materials in EOR. Additionally, the study compares biopolymers with synthetic polymers and evaluates the use of NPs and nanomaterials in terms of efficiency, cost, and environmental impact. Furthermore, this research examines the economic aspects associated with the application of biopolymers, NPs in EOR, considering costs and potential returns on investment. Continuous innovation in the use of biopolymers is seen as the future of EOR, offering a more ecological and responsible alternative for the exploitation of this valuable resource. The use of biopolymers, NPs contributes to a more sustainable oil industry, committed to environmental protection.

Keywords: biopolymers, enhanced oil recovery, copolymerization, nanocomposites and hydrogels.

INTRODUCCIÓN

Los biopolímeros, materiales naturales y biodegradables, están ganando protagonismo en diversas industrias [1] debido a su compatibilidad con el medioambiente. Su origen en fuentes renovables y su capacidad para minimizar el impacto ambiental [2,3] los convierten en una alternativa atractiva frente a los polímeros sintéticos derivados del petróleo. En el campo de la recuperación mejorada de petróleo (RMP), los biopolímeros emergen como una tendencia prometedora, con el potencial de reemplazar a los polímeros sintéticos tradicionales [4] y promover prácticas más sostenibles en la industria petrolera. La creciente demanda de soluciones rentables y ecológicas en la producción de petróleo impulsa el interés en los biopolímeros, NPs y nanomateriales. Su capacidad para mejorar la eficiencia de la extracción en diversas condiciones de yacimientos los convierte en una opción atractiva para la RMP. Esta revisión bibliográfica explora el potencial de los biopolímeros, NPs y nanomateriales en este campo, analizando sus ventajas, desafíos y las innovaciones que buscan optimizar su rendimiento en condiciones adversas.

Los biopolímeros pueden provenir de varias fuentes. Hay de origen vegetal, animal, algal y microbiano [5]. A continuación, se presentan algunos ejemplos, destacando sus propiedades y aplicaciones específicas, seguido de los mecanismos de acción de los biopolímeros en RMP e impacto en la eficiencia de barrido y la movilidad del petróleo.

Polisacáridos provenientes de biomasa vegetal y de microorganismos

La biomasa y los microorganismos son fuentes ricas en polisacáridos que puede ser utilizados en RMP, a continuación, se detallan algunos ejemplos importantes:

El xantano (goma xantana) es un heteropolisacárido ramificado producido por la bacteria *Xanthomonas campestris*. Posee alta viscosidad, estabilidad térmica y química, además de ser resistente a la degradación. Sus aplicaciones principales son como agente espesante, para control de movilidad del agua, y para reducción de la permeabilidad [6]. El mecanismo de acción del xantano implica un aumento significativo de la viscosidad del agua de inyección, lo que mejora la relación de movilidad entre el agua y el petróleo. Esto resulta en un frente de desplazamiento más uniforme, reduciendo el fenómeno de "fingering" y aumentando la eficiencia de barrido [7,8].

El escleroglucano es producido principalmente por hongos del género *Sclerotium*, especialmente por la especie *Sclerotium rolfisii* (polímero de glucosa con enlaces β -1,3 y β -1,6); exhibe alta viscosidad, excelente estabilidad, y facilidad para formar geles. Sus aplicaciones principales son control de movilidad, reducción de permeabilidad y bloqueo selectivo [9]. Debido a su estructura molecular rígida, el escleroglucano mantiene su viscosidad incluso a altas temperaturas y salinidades, lo que lo hace particularmente útil en yacimientos en condiciones adversas, donde puede mejorar significativamente la eficiencia de barrido y el desplazamiento del petróleo.

El dextrano es producido principalmente por bacterias del género *Leuconostoc* y *Streptococcus*, y se caracteriza por su baja viscosidad, incompatibilidad y biodegradabilidad. Se utiliza como agente de movilidad y para mejorar la permeabilidad. Esto se debe a que puede remover partículas que obstruyen los poros del yacimiento o prevenir la formación de depósitos que reducen la permeabilidad [10].

El alginato es un polisacárido biodegradable, y se encuentra principalmente en las paredes celulares de las algas pardas, un grupo diverso de macroalgas que incluye especies como el kelp, el fucus y el sargassum (polisacárido aniónico) que forman geles diseñados para controlar los problemas de flujo preferencial de fluidos en yacimientos de alta temperatura. El sistema polimérico de alginato también puede aprovechar los iones Ca_2^+ en el agua de formación, que existen en la mayoría de los yacimientos, para reforzar su resistencia capturando el Ca_2^+ para formar enlaces Ca-alginato [11]. En otros estudios se encapsuló poli(acrilamida) (PAM) en una cubierta de alginato de sodio (SA) mejorada con nanofibras de celulosa oxidadas con 2, 2, 6, 6-tetrametilpiperidinooxi (TOCNFs) para formar microcápsulas. El tiempo de liberación de PAM de las microcápsulas se prolongó significativamente con la adición de TOCNFs. La mayor resistencia al cizallamiento de las microcápsulas se atribuyó a la estructura de red semi-interpenetrante de alginato de sodio (AS) y TOCNFs a través del entrecruzamiento de Ca_2^+ y enlaces de hidrógeno [12].

La goma guar, es un polisacárido no iónico compuesto principalmente por manosa y galactosa. Presenta alta viscosidad a bajas concentraciones, buena estabilidad térmica y aceptable resistencia a la salinidad, sin embargo, es susceptible a la degradación bacteriana. La goma guar se utiliza principalmente como agente espesante en la inyección de agua para mejorar la eficiencia de barrido en yacimientos petroleros. En



menor medida, también se emplea para el control de movilidad y permeabilidad. La inyección de este polímero puede aumentar significativamente la recuperación de petróleo pesado; sin embargo, es importante destacar que la concentración de sal presente en el yacimiento influye considerablemente en su efectividad [13].

Ogunnkunle et al [13] evaluaron el rendimiento del polímero hidrofóbicamente asociativo (HAPAM), la goma xantana y la goma guar en procesos RMP. Investigaron su rendimiento en aplicaciones de recuperación de petróleo mediante análisis de comportamiento reológico y experimentos de inundación de núcleos. El petróleo acumulado recuperado después de la inundación con agua en diferentes muestras de núcleos de arenisca con propiedades petrofísicas similares implican que HAPAM muestra una mejor capacidad de recuperación de petróleo con 41,1, 62,4 y 63,5 % de petróleo recuperado en comparación con el xantano cuya capacidad de recuperación fue de 32,3, 33,7 y 56,2 % y de la goma guar con 41,8, 57,1 y 61,2 % de recuperación; utilizando las tres concentraciones; concentración, 1, 2 y 3 (1000, 4000 y 6000 ppm) respectivamente [14]. Bera et al [14] estudiaron el uso de NPs de sílice con goma guar para mejorar la recuperación de petróleo y encontraron que las NPs aumentan la viscosidad de la goma guar y mejoran su capacidad de recuperación de petróleo en experimentos de imbibición y de inundación de núcleos. La mezcla de goma guar y NPs de sílice cambió la humectabilidad de la roca, de ser mojada por petróleo a ser mojada por agua, lo que facilita la extracción de petróleo. Este método, que utiliza goma guar en lugar de poliácridamida o goma xantana, ofrece una nueva alternativa para RMP [15].

Elsayed et al [15] crearon dos nuevos hidrogeles a base de goma guar modificada para mejorar la recuperación de petróleo en yacimientos con alta salinidad. Estos hidrogeles, llamados, GG-g-poli (Am-AMPS) (GH) y GG-g-poli (Am-AMPS) /biocarbón (compuesto GBH), demostraron ser efectivos para extraer más petróleo que los métodos convencionales, especialmente en procesos de recuperación terciaria. Además, tienen la ventaja de ser biodegradables y de mejorar la humectabilidad de la roca, lo que facilita la extracción del petróleo.

Celulosa es un polisacárido lineal presente en todas las plantas terrestres y en algunos tunicados, se caracteriza por su baja solubilidad y alta viscosidad, aunque es susceptible a la degradación por microorganismos. Adicionalmente, la celulosa a escala nano (nanocelulosa) se presenta bajo nanocelulosa fibrilada (NCF) y nanocelulosa cristalizada (NCC), y sus aplicaciones en RMP incluyen su uso como agente espesante y como agente de control de movilidad y de permeabilidad. Ejemplos del uso de NCF y NCC han sido desarrollados por Wu, et al [11]. y por Molnes et al. [16]. Sus derivados como por ejemplo la carboximetil nanocelulosa (CMNC), también son usados para RMP, Yuan et al. [17]. observaron que los grupos modificados en la CMNC confirieron propiedades hidrofóbicas a la nanocelulosa, mejorando la interacción entre los diferentes grupos carboximetil y el petróleo crudo.

La lignina es un biopolímero heterogéneo amorfo, de naturaleza aromática, que está presente en las plantas vasculares (gimnospermas, angiospermas y pteridofitas) [18]. La lignina muestra alta estabilidad térmica y química, actividad superficial, y capacidad de modificación química. En RMP se utiliza para aumentar la viscosidad del agua inyectada, mejorando la eficiencia de barrido y previniendo la formación de canales preferenciales



[19]. Para aprovechar al máximo los residuos de lignina y al mismo tiempo tratar las aguas residuales aceitosas, se han diseñado y preparado racionalmente compuestos porosos a base de lignina [20]. Recientemente, se están desarrollando las nanoligninas (ligninas a escala nano) llamadas también NPs de lignina (LNPs, por sus siglas en inglés), para generar nanofluidos con aplicación en RMP [21]. De igual manera, se han desarrollado espumas de poliuretano superhidrofóbicas a base de aceite de castor y ligninas con NPs de carburo de silicio (SiC) para una separación eficiente y reciclable de la mezcla agua-petróleo [22].

Biopolímeros microbianos

La fermentación de microbios también es una fuente de producción de biopolímeros como el polihidroxialcanoato y polihidroxibutirato, dando lugar a una nueva área de estudio denominada bio-recuperación mejorada de petróleo (BEOR, por sus siglas en inglés) o BRMP (siglas en español) que incluye diferentes tipos de microorganismos, enzimas, biopolímeros, y bionanomateriales [23], entre otros, para RMP. A continuación, se detallan algunos ejemplos:

El polihidroxialcanoato (PHA), es un biopolímero producido mayormente por *Bacillus* spp, usando sustratos de biomasa y biomasa residual como fuente de alimento. A nivel de investigación, se ha realizado un enfoque ecobiotecnológico para producir copolímeros de polihidroxialcanoato (PHA) a partir de cáscaras de guisantes utilizando seis cepas de *Bacillus* spp. como cultivo mixto definido. La producción de copolímero se mejoró de 65 a 560 mg/L [24].

El polihidroxibutirato (PHB) es un biopolímero biodegradable, biocompatible y termoplástico. En RMP, se utiliza para crear microesferas para transporte en Recuperación Microbiana Mejorada de Petróleo (RMMP) [25]. Un estudio reciente aisló una bacteria productora de surfactina y polímeros, *Bacillus subtilis* RI4914, de un yacimiento petrolífero. Se investigó el efecto de la salinidad, la temperatura y el pH sobre la recuperación de petróleo por surfactina de *Bacillus subtilis* RI4914. La tensión interfacial aceite-agua (OW-IFT) disminuyó con la concentración de surfactina. La recuperación del petróleo se vio favorecida por el aumento en de la concentración de NaCl en la fase acuosa. La adición del biopolímero producido por *B. subtilis* RI4914 junto con la surfactina a la solución inyectada aumentó la recuperación de petróleo hasta en un 88 % del petróleo residual de las columnas llenas de arena [26].

Los biosurfactantes son otro grupo importante de biopolímeros microbianos derivados de fuentes renovables y biodegradables, que reducen la tensión interfacial y mejoran la humectabilidad. Sus aplicaciones en RMMP incluyen la mejora de la eficiencia de barrido y la remoción de petróleo residual [9,27,28]. Los tensioactivos derivados del petróleo utilizados en los procesos de RMP pueden tener impactos ambientales negativos. Los tensioactivos biosurfactantes derivados de recursos renovables y biodegradables son alternativas más sostenibles y respetuosas con el medio ambiente. Los hallazgos científicos muestran por qué se debe hacer hincapié en el desarrollo y la adopción de biosurfactantes en RMP como una contribución sustancial a una industria del petróleo y del gas más sostenibles y respetuosas con el medioambiente [29].



Al considerar esta amplia gama de biopolímeros y sus aplicaciones, la industria petrolera puede aprovechar su potencial para mejorar la recuperación de petróleo de manera sostenible y respetuosa con el medioambiente.

Mecanismos de acción de los biopolímeros en RMP

Los biopolímeros ejercen su influencia en la RMP principalmente a través de la modificación de las propiedades reológicas de los fluidos inyectados, lo que a su vez impacta la eficiencia de barrido y la movilidad del petróleo en el yacimiento. En relación con la modificación de las propiedades reológicas, se destacan tres mecanismos principales:

1. **Aumento de la viscosidad:** los biopolímeros, al ser macromoléculas de cadena larga, incrementan la viscosidad del agua inyectada. Esto se debe a que sus cadenas se entrelazan y forman una red tridimensional que resiste el flujo, generando una mayor fricción interna en el fluido.
2. **Reducción de la permeabilidad:** algunos biopolímeros pueden interactuar con la roca del yacimiento, absorbiéndose en su superficie o formando geles en los poros. Esto reduce la permeabilidad efectiva del agua, dificultando su paso a través de las zonas de alta permeabilidad y favoreciendo su flujo hacia zonas de baja permeabilidad donde el petróleo podría estar atrapado [30].
3. **El control de la relación de movilidad:** esta relación entre el agua inyectada y el petróleo es crucial para la eficiencia de barrido en la RMP. Los biopolímeros juegan un papel importante en este proceso al aumentar la viscosidad del agua y reducir su movilidad relativa al petróleo [31]. Esto promueve un frente de desplazamiento más estable y uniforme, evitando la formación de canales preferenciales que pueden disminuir la eficiencia de la recuperación. Además, la adición de biopolímeros puede ayudar a reducir la permeabilidad, lo que resulta en un desplazamiento más uniforme del petróleo y en una mayor recuperación [31,32,33].

Impacto en la eficiencia de barrido y la movilidad del petróleo con el uso de biopolímeros

Los biopolímeros pueden tener un gran impacto en la RMP en los siguientes aspectos:

- a) **Mejora de la eficiencia de barrido:** Al aumentar la viscosidad y reducir la permeabilidad en zonas de alta permeabilidad, los biopolímeros obligan al agua inyectada a fluir hacia zonas de baja permeabilidad que de otro modo serían ignoradas. Esto aumenta el área de contacto entre el agua y el petróleo, mejorando la eficiencia de barrido y movilizándolo adicional [34].
- b) **Mejora de la relación de movilidad:** La relación de movilidad (M) se define como $M = (k_w/\mu_w) / (k_o/\mu_o)$, donde "k" es la permeabilidad efectiva y "μ" es la viscosidad del agua (w) y "o" el petróleo. Los biopolímeros aumentan "μw", reduciendo M. Una relación de movilidad favorable ($M \leq 1$) resulta en un desplazamiento más eficiente del petróleo [35]. Por ejemplo, el xantano puede aumentar la viscosidad del agua de inyección de 1 cP a 10-50 cP, dependiendo de la concentración y las



condiciones del yacimiento. Esto puede reducir la relación de movilidad de 10-20 (desfavorable) a cerca de 1 o menos, lo que resulta en una mejora significativa en la eficiencia de barrido y, por ende, en la recuperación de petróleo [36].

- c) **Reducción del “Fingerprinting” y el “Channeling”:** El aumento de la viscosidad del agua inyectada ayuda a prevenir la formación de “dedos” o canales preferenciales, donde el agua fluye rápidamente a través de zonas de alta permeabilidad sin desplazar eficientemente el petróleo. Esto asegura un desplazamiento más uniforme y una mayor recuperación de petróleo [37].
- d) **Movilización de petróleo atrapado:** Al reducir la permeabilidad en zonas de alta permeabilidad, los biopolímeros pueden aumentar la presión de inyección y forzar al petróleo atrapado en los poros a moverse y ser desplazado hacia los pozos productores [38].

Los biopolímeros modifican las propiedades reológicas de los fluidos inyectados en RMP, aumentando la viscosidad, reduciendo la permeabilidad y controlando la relación de movilidad. Estos cambios mejoran la eficiencia de barrido, reducen la formación de canales preferenciales y movilizan petróleo atrapado, lo que se traduce en una mayor recuperación de petróleo y una producción más eficiente. No obstante, aunque los biopolímeros ofrecen numerosas ventajas en RMP, también existen desafíos asociados a su aplicación, como la sensibilidad a las condiciones del yacimiento (alta salinidad, temperatura) y la posible degradación microbiana de los biopolímeros. La investigación y el desarrollo continuos se centran en superar estos desafíos y ampliar el uso de biopolímeros en RMP [31].

Nanotecnología aplicada a RMP

En los últimos años, la nanotecnología emerge como una alternativa para maximizar la RMP gracias a sus técnicas de producción eficaces y de bajo costo. Las NPs (entre 10 y 100 nm de diámetro) adquieren propiedades mejoradas comparadas con las partículas más grandes (en bulk), como, por ejemplo, alta área superficial. Algunas investigaciones han demostrado que las NPs mejoran la recuperación de petróleo gracias a que reducen la tensión superficial y aumentan la humectabilidad del yacimiento. Ciertas NPs funcionan más eficientemente que otras, dependiendo de las condiciones de operación de la RMP. Las NPs se clasifican en partículas de óxido metálico, inorgánicas y orgánicas [28].

La nanotecnología ha atraído gran atención en la RMP debido a su rentabilidad y respeto al medioambiente. Las NPs exhiben propiedades significativamente diferentes en comparación con las mismas moléculas finas o a granel debido a la mayor concentración de átomos en su superficie. Una de las propiedades más útiles de estas partículas es la creación de una fuerza impulsora de difusión masiva debido a la gran superficie. Estudios previos han demostrado que las NPs pueden mejorar la recuperación de petróleo al cambiar la humectabilidad del yacimiento hacia más humectabilidad al agua y reducir la tensión interfacial. El potencial de las NPs para reducir la viscosidad del petróleo, aumentar la relación de movilidad y alterar la permeabilidad del yacimiento no se ha investigado hasta la fecha. En este estudio, nuestro objetivo es proporcionar un resumen de las NPs disponibles en el mercado y enumerar sus condiciones operativas óptimas [32].

Mecanismos de acción de las NPs

Las NPs poseen alta área superficial en relación con su volumen, así como también efectos cuánticos y reactividad mejorada en RMP; propiedades que permiten mecanismos en RMP, como el mejoramiento de la humectabilidad y estabilidad térmica, la reducción de la tensión interfacial, la obstrucción selectiva y la desviación de fluidos, y los efectos catalíticos. A continuación, se resumen algunos tipos de NPs y sus efectos detallados por Hassan [33]:

- 1. NPs de óxido de silicio y titanio.** Son las más populares en los campos petroleros del Oriente Medio. Pueden modificar las propiedades de la superficie de la roca, mejorando la inhibición del agua y el desplazamiento del petróleo
- 2. NPs recubiertas de surfactante.** Pueden reducir la tensión interfacial entre el petróleo y el agua y facilita el flujo del petróleo.
- 3. NPs de óxido metálico.** Las más empleadas son las de óxido de aluminio y óxido de zinc, las cuales mejoran la conductividad térmica y estabilidad durante los métodos termales de RMP, por ejemplo, la inundación de vapor. Otras NPs metálicas, como las de óxido de hierro, tienen propiedades catalíticas porque pueden promover reacciones químicas in situ que generan gases, facilitando el desplazamiento de petróleo.
- 4. NPs recubiertas con polímeros.** Tienen la habilidad de tapar selectivamente zonas de alta permeabilidad y redirigir los fluidos de inyección, conduciendo a un barrido más uniforme y una mayor recuperación de petróleo. Se aplican con buenos resultados en los pozos de petróleo pesado de Canadá.

Los procesos bionano son una fusión entre biología, biotecnología y nanotecnología e integran las ventajas y beneficios de los microorganismos y de las NPs que provee una sinergia para la RMP, convirtiéndose en un enfoque promisorio eficaz para optimizar la RMP cuidando aspectos de productividad (económicos), ambientales y de sostenibilidad.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizó una revisión sistemática de la literatura científica y técnica publicada entre 2020 y 2024, en las bases de datos Web of Science, Scopus y Google Scholar. Se utilizaron las siguientes palabras clave: "biopolímeros", "copolimerización", "nanocompuestos", "hidrogeles" y "recuperación mejorada de petróleo", así como combinaciones de estas. Se seleccionaron artículos en función de los siguientes criterios de inclusión:

- 1. Relevancia temática:** estudios relacionados con el uso de biopolímeros y NPs en la RMP.
- 2. Calidad y rigor científico:** artículos publicados en revistas científicas y tesis doctorales con una metodología sólida y bien descrita.



- 3. Actualidad:** estudios publicados en los últimos cinco años (2020-2024). Se excluyeron artículos que no cumplieran con estos criterios, incluyendo aquellos que no abordaban directamente el tema de interés o presentaban deficiencias metodológicas significativas. Los artículos seleccionados se analizaron críticamente, extrayendo información sobre avances recientes en la investigación de biopolímeros, NPs y nanomateriales para RMP, comparación del desempeño de biopolímeros y polímeros sintéticos, potencial de los biopolímeros, NPs y nanomateriales en RMP, desafíos en su aplicación, innovaciones para optimizar su rendimiento, consideraciones económicas y su relación con la sostenibilidad.

Avances recientes en la investigación de biopolímeros y NPs para RMP

La investigación en el campo de los biopolímeros y NPs para RMP está en constante evolución, impulsada por la necesidad de soluciones más eficientes, sostenibles y adaptables a las diversas condiciones de los yacimientos. A continuación, se destacan algunos de los avances más recientes y prometedores.

Técnicas de modificación

- 1. Funcionalización con NPs:** La incorporación de NPs como sílice, arcilla o nanotubos de carbono en la estructura de los biopolímeros, puede mejorar significativamente sus propiedades. Esto incluye un aumento de la viscosidad, mayor estabilidad térmica y química, y mejor control de la permeabilidad [15,34]. Las NPs coloidales de sílice funcionalizadas con amida modifican la superficie de las NPs de sílice, mejorando significativamente su estabilidad en condiciones de yacimiento, es decir, crea una capa protectora alrededor de las NPs, evitando su interacción directa con la roca y el crudo, lo que reduce la posibilidad de desestabilización y sedimentación. Esto permite que las nanopartículas permanezcan dispersas, activas, garantizando su transporte efectivo y su capacidad para mejorar la recuperación de petróleo de manera eficiente y sostenible. La ventaja de esta técnica es la de mejorar la estabilidad de NPs de sílice para RMP [34].
- 2. Copolimerización:** Implica la combinación de diferentes monómeros para crear copolímeros, permitiendo diseñar biopolímeros con propiedades individualizadas para aplicaciones específicas en RMP [35]. La ventaja de esta técnica es que mejora la resistencia a la salinidad y temperatura en la RMP, sobre todo en los yacimientos petrolíferos maduros, en donde la producción primaria y secundaria ha disminuido, dejando petróleo atrapado en los poros de la roca. La copolimerización de polisacáridos con polímeros sintéticos, o la combinación estratégica de diferentes biopolímeros, modifica la estructura química de estos compuestos, lo que incrementa su resistencia frente a las condiciones adversas del yacimiento y optimiza sus propiedades para la RMP.
- 3. Formación de hidrogeles:** Los hidrogeles son redes tridimensionales de polímeros capaces de absorber grandes cantidades de agua que ofrecen un gran potencial en RMP. La formación de hidrogeles a partir de biopolímeros puede ser utilizada para bloquear selectivamente zonas de alta permeabilidad, controlar la pérdida de fluidos y mejorar la eficiencia de barrido [36]. En la producción de petróleo, el agua



indeseada puede infiltrarse en los pozos, reduciendo la eficiencia de la extracción y aumentando los costos de producción. Los métodos tradicionales para controlar el flujo de agua, como la inyección de cemento o polímeros sintéticos, pueden ser costosos, tener un impacto ambiental negativo y no siempre ser efectivos en formaciones complejas. El desarrollo de hidrogeles resistentes y biodegradables a partir de copolímeros y nanocelulosa para el taponamiento selectivo de zonas de alta permeabilidad en yacimientos petrolíferos es una solución viable. La ventaja de esta técnica es el taponamiento de agua en yacimientos petrolíferos [37].

Aplicaciones innovadoras

1. **RMP en yacimientos de shale:** Los biopolímeros (polisacáridos provenientes de biomasa y de microorganismos) están siendo investigados para su aplicación en la recuperación de petróleo de yacimientos de esquisto (shale) [38], donde las condiciones extremas de presión y temperatura presentan desafíos significativos. La modificación química y la formación de hidrogeles pueden mejorar la estabilidad y el rendimiento de los biopolímeros en estos entornos.
2. **RMP en yacimientos costa afuera:** Los biopolímeros biodegradables ofrecen una alternativa atractiva para RMP en yacimientos costa afuera (offshore), donde las afectaciones por el impacto ambiental son críticas. Su uso puede minimizar el impacto en los ecosistemas marinos y facilitar el cumplimiento de las regulaciones ambientales [39].
3. **RMP inteligente:** La combinación de biopolímeros con tecnologías inteligentes, como sensores y nanomateriales, puede permitir un monitoreo en tiempo real y un control preciso de las operaciones de RMP. Esto puede optimizar la inyección de fluidos, mejorar la eficiencia de barrido y maximizar la recuperación de petróleo [40].

Otros posibles enfoques de los biopolímeros y fuentes renovables y circulares

1. **Biopolímeros de microalgas:** Las microalgas, organismos fotosintéticos unicelulares, están emergiendo como una fuente prometedora de biopolímeros para RMP. Estos biopolímeros, como el alginato y el carragenano, presentan ventajas como alta viscosidad, biodegradabilidad y capacidad de formar geles; además, su producción a partir de microalgas ofrece beneficios ambientales, como la captura de CO₂ y la reducción de la dependencia de recursos fósiles [36,37].
2. **Biopolímeros de residuos agrícolas:** La valorización de residuos agrícolas, como bagazo de caña de azúcar, cáscaras de arroz, raquis del plátano, paja de trigo, entre otros, utilizados para la producción de biopolímeros, representa una estrategia sostenible, circular y económicamente atractiva. Estos biopolímeros, como la celulosa y la hemicelulosa, pueden ser modificados químicamente para mejorar sus propiedades y adaptarse a las condiciones específicas de los yacimientos [32].

A continuación, en la Tabla 1 se presentan de manera resumida otras investigaciones desarrolladas recientemente sobre biopolímeros aplicados en RMP.

TABLA 1. Algunas investigaciones en el campo de los biopolímeros aplicados en RMP

Biopolímeros	Técnicas/métodos	Efectos	Ref
Biopolímeros modificados por medio del uso de materia prima ecoamigable (quitosano, celulosa, almidón)	Modificación de biopolímeros	Ofrece múltiples beneficios: mejora la producción de petróleo, representa una alternativa sostenible a los polímeros sintéticos, presenta propiedades adaptables a diversas aplicaciones en RMP y reduce significativamente el impacto ambiental de las operaciones.	[4]
Goma xantana asociativa hidrofóbica (HAXG)	Modificación hidrofóbica.	Proporciona mayor viscosidad y propiedades reológicas mejoradas, reduciendo significativamente la tensión interfacial y aumentando la eficiencia de recuperación de petróleo incluso en ambientes de yacimiento con condiciones adversas.	[7]
Inyección de polímeros de goma guar asistida por NPs de sílice	Inyección de polímeros asistida por NPs.	Potencia la recuperación de petróleo en formaciones de arenisca mediante tres mecanismos: aumento de viscosidad del fluido inyectado, reducción de la permeabilidad en zonas saturadas y modificación favorable de la mojabilidad de la roca.	[14]
Polímero hidrosoluble asociativo (PHA)	Síntesis y caracterización.	Facilita la movilización y extracción de hidrocarburos pesados mediante propiedades reológicas mejoradas, especialmente diseñado para las condiciones particulares de yacimientos con petróleo de alta viscosidad.	[15]
Goma guar	Modificados por medio del uso de materia prima ecoamigable.	Permite aplicación efectiva en RMP bajo condiciones de alta salinidad y temperatura, constituyendo una alternativa sostenible y ambientalmente favorable para la industria petrolera.	[27]
Goma Xantana modificada anfipática (XGP20)	Modificación química anfipática.	Incrementa la resistencia a condiciones de alta temperatura y salinidad, potenciando la viscosidad del fluido y optimizando la eficiencia del proceso de recuperación de petróleo.	[41]
Biopolímero (Escleroglucano)	Evaluación experimental en rocas carbonatadas bajo condiciones adversas.	Demuestra excepcional capacidad viscosificante y comportamiento de adelgazamiento por cizallamiento, manteniendo buena inyectividad incluso en formaciones carbonatadas bajo condiciones de yacimiento desfavorables.	[42]
Nanofluido de almidón cristalino (CSNF) y solución de almidón de yuca (CS)	Síntesis de NPs de almidón cristalino, aplicación en RMP.	Optimiza múltiples parámetros críticos para la RMP: incrementa la viscosidad del fluido de desplazamiento, reduce la tensión interfacial entre fases, modifica la humectabilidad de la roca y aumenta la recuperación total con beneficios económicos demostrables.	[43]



Biopolímeros	Técnicas/métodos	Efectos	Ref
Derivado de palmitato-goma guar	Simulación experimental y de Monte Carlos.	Actúa como eficiente agente de inundación mediante la reducción de tensión interfacial, modificación de mojabilidad y aumento de viscosidad, manteniendo estabilidad bajo diversas condiciones de yacimiento para aplicaciones a largo plazo.	[44]
Goma guar modificada químicamente con monómeros vinílicos sintéticos	Modificación química.	Exhibe resistencia mejorada a condiciones extremas de temperatura y salinidad, con propiedades viscosificantes superiores que permiten su aplicación efectiva en yacimientos de arenisca con condiciones severas.	[45]
Goma xantana con NPs de dióxido de titanio (TiO ₂)	Inducción de NPs.	Permite la recuperación de viscosidad perdida por factores ambientales adversos, mejora la estabilidad general del fluido y modifica favorablemente la mojabilidad de la roca, optimizando el desplazamiento de hidrocarburos.	[46]
Galactomanano de guar aumentado en viscosidad (VGG)	Aumento de viscosidad, alteración de la mojabilidad	Incrementa la recuperación de petróleo en formaciones carbonatadas con saturación de aceite al modificar la mojabilidad de las superficies rocosas hacia condiciones más favorables al agua, mejorando el desplazamiento del hidrocarburo.	[47]
Polímeros (sintéticos y biopolímeros), (Xantano y copolímeros que contienen un alto nivel de sulfonato de 2-acrilamido-2-metilpropano (AMPS))	Simulación dinámica 3D, modelos económicos en investigaciones experimentales	Demuestra que las tecnologías de inyección de polímeros y PAG proporcionan mayor recuperación de hidrocarburos, con biopolímeros mostrando ventajas adaptativas bajo ciertas condiciones específicas de yacimiento.	[48]
Nanoplaquetas de grafeno (GNP) funcionalizadas con biopolímeros, (goma arábiga)	Evaluación de estabilidad, experimentos de adsorción e inyección	Potencia la adsorción de inhibidores de incrustaciones, exhibe perfiles favorables de inyectividad, extiende significativamente la vida útil del tratamiento y genera un potencial de recuperación incremental de hidrocarburos de hasta un 8 %.	[49]
Soluciones de biopolímeros (Esquizofilano, scleroglucano, goma guar y goma xantana)	Caracterización reológica	Presenta propiedades reológicas óptimas para diversas aplicaciones de RMP, demostrando versatilidad y adaptabilidad según las necesidades específicas del yacimiento tratado.	[50]
Polímeros sintéticos (ATBS) y biopolímero (escleroglucano)	Evaluación de rendimiento en yacimientos carbonatados bajo condiciones adversas	Revela comportamientos complementarios: el escleroglucano demuestra mayor estabilidad bajo condiciones extremas mientras que el ATBS exhibe mejor inyectividad, permitiendo seleccionar el polímero óptimo según las necesidades específicas del yacimiento.	[51]



Biopolímeros	Técnicas/ métodos	Efectos	Ref
Hidrogel inteligente a base de nanocristales de celulosa (CNC)	RMP con CO ₂ y secuestro de carbono	Optimiza simultáneamente la eficiencia de barrido, el control del flujo de fluidos y la recuperación total de petróleo, con el beneficio adicional de contribuir al secuestro de carbono como estrategia de mitigación climática.	[52]
Solución de goma xantana mejorada con nanosílices modificadas en la superficie	Modificación superficial de nanosílices	Aumenta significativamente la tolerancia a condiciones extremas de temperatura y salinidad, potencia las propiedades viscosificantes y maximiza la eficiencia de recuperación de petróleo en yacimientos con condiciones desafiantes.	[53]
Polímeros naturales	Inyección alternada de agua y gas, (WAG) con polímeros naturales, (PWAG)	Incrementa la eficiencia de barrido en formaciones heterogéneas y aumenta la eficiencia total de recuperación entre un 6 % y 10 %, ofreciendo una alternativa más sostenible a los métodos convencionales de WAG.	[54]
Goma welan modificada con poli(2-oxazolona)	Modificación química.	Funciona como polímero termoviscosificante altamente efectivo para aplicaciones de RMP en yacimientos de alta temperatura, donde los polímeros convencionales suelen degradarse o perder eficacia.	[55]
Biopolímeros modificados por medio del uso de materia prima ecoamigable	Modificación de biopolímeros, diversas técnicas de RMP	Demuestra gran potencial para incrementar la producción de petróleo mediante una aproximación sostenible y efectiva, adaptable a diversos tipos de yacimientos y condiciones de operación.	[56]
Combinación de álcali, biosurfactante y biopolímero (AbSbP)	Recuperación mejorada de petróleo/ procesos químicos	Aprovecha el mecanismo sinérgico entre componentes para maximizar la eficiencia de recuperación, utilizando α -metil éster sulfonato de sodio como alternativa ecológica a surfactantes convencionales derivados del petróleo.	[57]
Fluido de ruptura de gel (GBF) a base de gel de limpieza de surfactante polimérico	Evaluación de rendimiento y efecto en RMP.	Proporciona mejora significativa en la recuperación de petróleo mediante un mecanismo dual de limpieza y control de movilidad, optimizando el desplazamiento del hidrocarburo residual.	[58]
Hidroxietilcelulosa (HEC), goma xantana y goma guar	Evaluación de propiedades reológicas y resultados de inundación en núcleos bajo condiciones adversas	Presenta comportamiento reológico variable según el tipo de biopolímero, resultando en diferentes tasas de recuperación de petróleo para cada uno, lo que permite seleccionar el más adecuado según las características específicas del yacimiento.	[59]



Como se muestra en la Tabla 1, son cada vez más los estudios desarrollados enfocados en demostrar que los biopolímeros y nanomateriales pueden mejorar la recuperación de petróleo en comparación con los métodos convencionales.

A continuación, en la Tabla 2 se compara las características más relevantes del desempeño de biopolímeros y polímeros sintéticos en RMP

TABLA 2. Comparación del desempeño de biopolímeros y polímeros sintéticos en RMP [60,61,62,63,64,65,66]

Característica	Biopolímeros	Polímeros sintéticos
Origen	Producidos por organismos vivos	Derivados del petróleo
Eficiencia		
Disponibilidad	Variable	Alta
Viscosidad	Generalmente menor que los sintéticos, pero suficiente para muchas aplicaciones	Alta viscosidad, ideal para control de movilidad y barrido
Estabilidad térmica y química	Variable, algunos son sensibles a altas temperaturas y salinidad	Generalmente alta estabilidad, adecuados para condiciones adversas
Biodegradabilidad	Alta, reduce el impacto ambiental a largo plazo	Baja o nula, pueden persistir en el yacimiento
Costo		
Producción	Puede ser más alto debido a la complejidad de la extracción y procesamiento	Generalmente más bajo debido a procesos de producción establecidos
Transporte y almacenamiento	Similar a los sintéticos, depende de la forma y concentración	Similar a los biopolímeros
Impacto ambiental		
Toxicidad	Baja, generalmente no tóxicos para el medio ambiente	Variable, algunos pueden ser tóxicos
Renovabilidad	Renovables	No renovables
Huella de carbono	Menor, provienen de fuentes renovables	Mayor, provienen de fuentes fósiles
Biocompatibilidad	Adecuados para su uso en yacimientos sensibles al medio ambiente o en áreas donde las regulaciones ambientales son estrictas	Baja o nula adecuación con el medio ambiente

La elección entre biopolímeros, polímeros sintéticos, NPs y nanomateriales depende de las condiciones específicas del yacimiento, las consideraciones ambientales y los objetivos económicos. Los biopolímeros ofrecen una alternativa sostenible y respetuosa con el medio ambiente, mientras que los polímeros sintéticos pueden ser más eficientes y económicos en ciertas situaciones. La investigación y el desarrollo continuos buscan mejorar el rendimiento de los biopolímeros y reducir su costo, ampliando su aplicabilidad en RMP y contribuyendo a una industria petrolera más sostenible [67]. El uso de NPs y



nanomateriales en combinación con biopolímeros pueden mejorar el desplazamiento del petróleo al alterar la mojabilidad y propiedades interfaciales optimizando el factor de recobro y controlar la formación de emulsiones y espumas indeseadas [57].

Ventajas y Potencial de los biopolímeros en RMP

Los biopolímeros presentan un enorme potencial en la RMP, ofreciendo ventajas significativas sobre los polímeros sintéticos tradicionales. Entre las principales ventajas se pueden anotar las siguientes:

1. **Biodegradabilidad y compatibilidad ambiental:** La naturaleza biodegradable de los biopolímeros minimiza el impacto ambiental de las operaciones de RMP, reduciendo la contaminación del subsuelo y las aguas subterráneas. Además, su baja toxicidad los hace adecuados para su uso en yacimientos sensibles al medio ambiente [68].
2. **Mejora de la eficiencia de barrido:** Los biopolímeros pueden aumentar la viscosidad del agua inyectada, lo que mejora la eficiencia de barrido y reduce la movilidad del fluido, permitiendo un desplazamiento más uniforme del petróleo y una mayor recuperación [69].
3. **Control de la permeabilidad:** Los biopolímeros tienen la capacidad de disminuir selectivamente la permeabilidad en zonas altamente permeables del yacimiento, lo que optimiza el control de flujo de los fluidos inyectados. Este mecanismo redirige estratégicamente el fluido hacia regiones de baja permeabilidad, permitiendo acceder y movilizar el petróleo que permanecía atrapado en estas áreas, incrementando así la eficiencia de barrido y la recuperación total. [41].
4. **Estabilidad térmica y química:** Algunos biopolímeros, como la escleroglucana, exhiben una buena estabilidad térmica y química, lo que los hace adecuados para su uso en yacimientos de alta temperatura y salinidad [15,70].

Ventajas de las NPs y nanomateriales

Las ventajas más relevantes del uso de NPs y nanomateriales en RMP son la alteración de la humectabilidad, la reducción de la tensión interfacial (TIF), la mejora de la reología y el control de movilidad. Recientes estudios han propuesto el uso de nanopartículas (NPs) para estabilizar microemulsiones (ME) y mejorar la recuperación de petróleo en condiciones difíciles. Se han desarrollado métodos para producir NPs de óxido de hierro in situ en ME de aceite en agua (o/w). Los resultados indicaron que el uso de ME puede aumentar significativamente la eficiencia de recuperación de petróleo, es decir, pasando del 10 % para ME sin NPs estabilizadoras al 28,9 % a una concentración de NPs de 6400 ppm [11].

Desafíos en la aplicación de biopolímeros y NPs y nanomateriales

A pesar del sinnúmero de investigaciones realizadas hasta el momento en esta área, aún quedan muchas dificultades por resolver. Entre las principales se pueden anotar la sensibilidad a las condiciones de yacimiento, la degradación microbiana para los



biopolímeros, la escalabilidad para las NPs y nanomateriales y el costo, las cuales se detallan a continuación:

- 1. Sensibilidad a las condiciones del yacimiento:** Las condiciones adversas presentes en muchos yacimientos, como alta salinidad, temperaturas elevadas y presencia de iones divalentes, pueden deteriorar significativamente la viscosidad y estabilidad de los biopolímeros, lo que limita su aplicación efectiva en estos entornos hostiles [71,72].
- 2. Degradación microbiana:** Los biopolímeros son inherentemente susceptibles a la degradación por acción de microorganismos naturalmente presentes en el yacimiento. Este proceso de biodegradación puede comprometer gradualmente su efectividad, reduciendo su rendimiento en aplicaciones que requieren estabilidad a largo plazo [73].
- 3. Viabilidad económica:** Los biopolímeros frecuentemente presentan costos de producción superiores en comparación con los polímeros sintéticos convencionales, a pesar de sus ventajas ambientales. Esta desventaja económica representa un obstáculo significativo para su implementación a escala industrial y comercial [63,64,65,66].
- 4. Complejidad de las NPs y nanomateriales:** La aplicación de nanopartículas y nanomateriales enfrenta múltiples desafíos relacionados con su potencial toxicidad, impacto medioambiental, escalabilidad de producción, incertidumbre regulatoria y aceptación pública. Para aprovechar el potencial de estas tecnologías de manera segura y responsable, es fundamental establecer estrategias de investigación multidisciplinaria, innovación continua y colaboración entre los sectores académico, industrial y regulatorio [74].

Innovaciones para optimizar el rendimiento de los biopolímeros

El uso de los biopolímeros en RMP puede optimizarse mediante diversas estrategias de innovación tecnológica. Entre las más prometedoras se destacan:

- 1. Modificación química:** La transformación de la estructura química de los biopolímeros permite mejorar su resistencia a la degradación, aumentar su estabilidad térmica y química, y potenciar su rendimiento bajo las condiciones adversas presentes en diversos yacimientos [31].
- 2. Desarrollo de sistemas híbridos:** La combinación estratégica de biopolímeros con polímeros sintéticos o nanopartículas posibilita la creación de sistemas híbridos con propiedades superiores, como mayor resistencia a la degradación y control optimizado de la permeabilidad en diferentes zonas del yacimiento [75,76].
- 3. Aplicación de ingeniería genética:** La manipulación genética dirigida de microorganismos productores de biopolímeros facilita el desarrollo de compuestos con propiedades personalizadas específicamente diseñadas para las diversas aplicaciones y condiciones de la RMP [77].



Consideraciones económicas del uso de biopolímero, NPs y nanomateriales en RMP

La viabilidad económica de los biopolímeros en RMP es un factor crucial a considerar, ya que impacta directamente en la rentabilidad de los proyectos de recuperación de petróleo. A continuación, se analizan los principales aspectos económicos:

Costos asociados

Son varios los costos asociados al uso de biopolímeros, NPs, y nanomateriales en RMP. Los más relevantes se mencionan a continuación:

- 1. Costo de producción de biopolímeros:** Puede ser más elevado que el de los polímeros sintéticos debido a la complejidad de los procesos de extracción, purificación y modificación química; sin embargo, el avance en la biotecnología y la utilización de fuentes renovables y residuos agrícolas están contribuyendo a reducir estos costos [57,58,78].
- 2. Transporte y almacenamiento:** Los costos de transporte y almacenamiento dependen de la forma y concentración del biopolímero. En general, los biopolímeros en polvo o gránulos son más fáciles de transportar y almacenar que las soluciones líquidas, lo que puede reducir los costos logísticos [79].
- 3. Aplicación:** El costo de aplicación de biopolímeros en el yacimiento incluye la preparación de la solución, la inyección y el monitoreo del proceso. Estos costos pueden variar dependiendo de las características del yacimiento, la tecnología de inyección utilizada y la complejidad del proyecto [80].

Potencial de retorno de la inversión

Está influenciado por tres puntos importantes que se indican a continuación:

- 1. Mayor recuperación de petróleo:** Los biopolímeros pueden mejorar significativamente la recuperación de petróleo en comparación con los métodos convencionales, lo que se traduce en un mayor volumen de producción y mayores ingresos [81].
- 2. Beneficios ambientales:** El uso de biopolímeros biodegradables puede reducir los costos asociados a la remediación ambiental y el cumplimiento de regulaciones, además de mejorar la imagen de la empresa en términos de sostenibilidad [82].

Análisis costo-beneficio

La evaluación económica de los biopolímeros en RMP debe considerar un análisis detallado de los costos y beneficios potenciales dependiendo de cada caso; no obstante, factores como el precio del petróleo, las características del yacimiento, la tecnología disponible y las regulaciones ambientales influyen en la viabilidad económica de cada proyecto [83].



Biopolímeros y sostenibilidad

La adopción de biopolímeros en la RMP trasciende los beneficios económicos y técnicos, posicionándose como un pilar fundamental en la transición hacia una industria petrolera más sostenible y alineada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODSs) [11].

Beneficios ambientales:

El uso de biopolímeros biodegradables puede reducir los costos asociados a la remediación ambiental y el cumplimiento de regulaciones, además de mejorar la imagen de la empresa en términos de sostenibilidad [82].

Reducción de costos operativos:

La mejora en la eficiencia de barrido y la reducción de la necesidad de inyectar grandes volúmenes de agua pueden disminuir los costos operativos a largo plazo [83].

Reducción del impacto ambiental

- 1. Biodegradabilidad:** La naturaleza biodegradable de los biopolímeros minimiza la contaminación del subsuelo y las aguas subterráneas, protegiendo los ecosistemas y la biodiversidad. Esto contribuye directamente al ODS 6 (agua limpia y saneamiento) y al ODS 15 (vida de ecosistemas terrestres).
- 2. Baja toxicidad:** La ausencia de sustancias tóxicas en los biopolímeros reduce el riesgo de daños a la salud humana y al medio ambiente, promoviendo el ODS 3 (salud y bienestar) y el ODS 12 (producción y consumo responsables).
- 3. Menor huella de carbono:** La producción de biopolímeros a partir de fuentes renovables, como residuos agrícolas y microalgas, disminuye la dependencia de recursos fósiles y las emisiones de gases de efecto invernadero, contribuyendo al ODS 13 (acción por el clima).

Fomento de la Bioeconomía Circular

- 1. Valorización de residuos:** La utilización de residuos agrícolas y otros subproductos como materia prima para la producción de biopolímeros promueve la economía circular y reduce el desperdicio, en línea con el ODS 12 (producción y consumo responsables).
- 2. Desarrollo de bioeconomías locales:** La producción y aplicación de biopolímeros pueden impulsar el desarrollo de bioeconomías locales, generando empleo y promoviendo el crecimiento económico sostenible en comunidades cercanas a los yacimientos, contribuyendo al ODS 8 (trabajo decente y crecimiento económico).

Responsabilidad social empresarial

- 1. Imagen corporativa:** La adopción de tecnologías sostenibles, como los biopolímeros, mejora la imagen corporativa de las empresas petroleras, demostrando



su compromiso con la protección del medio ambiente y la responsabilidad social, en consonancia con el ODS 12 (producción y consumo responsable) y el ODS 17 (alianzas para lograr los objetivos).

- 2. Licencia social para operar:** El uso de biopolímeros puede facilitar la obtención de la licencia social para operar, al reducir el impacto ambiental de las actividades de RMP y generar confianza en las comunidades locales, contribuyendo al ODS 16 (paz, justicia e instituciones sólidas).

RESUMEN Y CONCLUSIONES

Los biopolímeros, NPs y nanomateriales desempeñan un papel crucial en la construcción de una industria petrolera más sostenible y responsable. Su adopción no solo mejora la eficiencia de la recuperación de petróleo, sino que también reduce el impacto ambiental, promueve la economía circular y fortalece la licencia social para operar. Al elegir biopolímeros, NPs y nanomateriales, la industria petrolera puede alinearse con los Objetivos de Desarrollo Sostenible y contribuir a un futuro más limpio y equitativo para todos.

El uso de biopolímeros, NPs y nanomateriales se perfila como una solución innovadora y sostenible para la RMP. A pesar de los retos técnicos y operativos que aún persisten, su potencial para incrementar la producción de manera ecológica y a un costo reducido los convierte en una herramienta clave para la industria petrolera del futuro. La continua investigación y desarrollo en este campo permitirá superar las limitaciones actuales y consolidar a los biopolímeros, NPs y nanomateriales como alternativas viables y responsables en la búsqueda de un futuro energético más sostenible.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer a la Universidad San Francisco, por el espacio para la publicación.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

Lourdes Orejuela-Escobar, Edwars Naranjo, e Inés Hernández diseñaron y concibieron la revisión de los artículos reseñados. Edwars Naranjo, Inés Hernández y Lourdes Orejuela realizaron la escritura del manuscrito, y Lourdes Orejuela-Escobar realizó la edición, validación y revisión final del documento.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores manifiestan que no hay conflicto de intereses en esta investigación y que no ha habido financiación externa para esta investigación. No existe ningún interés financiero ni no financiero que declarar.

REFERENCIAS

- [1] Emad, W. (2022). Effects of trapping number on biopolymer flooding recovery of carbonate reservoirs. *Petroleum Exploration and Development Online*, 49(4), 895-905. [https://doi.org/10.1016/S1876-3804\(22\)60319-7](https://doi.org/10.1016/S1876-3804(22)60319-7)
- [2] Kumar, A., Mishra, R. K., Verma, K., Aldosari, S. M., Maity, C. K., Verma, S., & Thakur, V. K. (2023). A comprehensive review of various biopolymer composites and their applications: From biocompatibility to self-healing. *Materials Today Sustainability*, 23, 100431. <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2023.100431>
- [3] de Souza, C. K., Ghosh, T., Lukhmana, N., Tahiliani, S., Priyadarshi, R., Hoffmann, T. G., [...] & Han, S. S. (2023). Pullulan as a sustainable biopolymer for versatile applications: A review. *Materials Today Communications*, 36, 106477. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.106477>
- [4] Abou-alfitooh, S. A., & El-hoshoudy, A. N. (2024). Eco-friendly modified biopolymers for enhancing oil production: A review. *Journal of Polymers and the Environment*, 32(5), 2457-2483. <https://doi.org/10.1007/s10924-023-03132-1>
- [5] Rodríguez-Gomez, D., López-Ramírez, V., Alpizar-Negrete, A., & Calixto-Olalde, M. E. (2020). *Biopolímeros: de principio a fin. Mujeres en la Ciencia Biología*, ECORFAN, 107-129.
- [6] Saravia, J. M. H. (n.d.). *Injectivity of biopolymers solutions through porous media* <https://doi.org/10.47749/tunicamp.2023.1390915>
- [7] Fu, X., Qin, F., Liu, T., & Zhang, X. (2021). Enhanced oil recovery performance and solution properties of hydrophobic associative xanthan gum. *Energy & Fuels*, 36(1), 181-194. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.1c02941>
- [8] Gao, X., Huang, L., Xiu, J., Yi, L., & Zhao, Y. (2023). Evaluation of viscosity changes and rheological properties of diutan gum, xanthan gum, and scleroglucan in extreme reservoirs. *Polymers*, 15(21), 4338. <https://doi.org/10.3390/polym15214338>
- [9] García, R. H. C. (2024). *Evaluación de las interacciones biopolímero escleroglucano (grado RMP), entrecruzador y nanopartícula basada en el comportamiento de las propiedades reológicas y desempeño en recobro mejorado* [Tesis doctoral, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio Institucional – Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/85890>
- [10] Meleán Brito, R. S., Padró, J. M., Villa-Pérez, C., Strumia, M. C., Mattea, F., & Milanesio, J. M. (2024). Hydrophobic dendritic modification of a poly (acrylamide-co-acrylic acid) copolymer with Behera s amine as viscous agent. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 63(31), 13580-13589. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.4c01650>
- [11] Pu, J., Bai, B., & Schuman, T. P. (2021). Systematic evaluation of a novel self-healing poly (acrylamide-co-vinyl acetate)/alginate polymer gel for fluid flow control in high temperature and high salinity reservoirs. *Polymers*, 13(21), 3616. <https://doi.org/10.3390/polym13213616>
- [12] Wu, Y., Jiang, Z., Wang, Y., Jiang, X., Hou, J., & Wei, B. (2024). TEMPO oxidized cellulose nanofiber-reinforced sodium alginate encapsulated poly (acrylamide) microcapsules and its releasing behaviours for enhancing oil recovery. *International Journal of Biological Macromolecules*, 281, 135707. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.135707>
- [13] Olabode, O., Oni, B., Dike, H., Akinsanya, O., Ajidahun, J., & Olaniyan, D. (2024). Investigating the effect of salt concentration on oil recovery during guar gum polymer flooding: A simulation study. *Results in Engineering*, 22, 102269. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102269>
- [14] Ogunkunle, T. F., Oni, B. A., Afolabi, R. O., Fadairo, A. S., Ojo, T., & Adesina, O. (2022). Comparative analysis of the performance of hydrophobically associating polymers, xanthan and guar gum as mobility controlling agents in enhanced oil recovery application. *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, 34(7), 402-407. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2022.01.003>
- [15] Bera, A., Shah, S., Shah, M., Agarwal, J., & Vij, R. K. (2020). Mechanistic study on silica nanoparticles-assisted guar gum polymer flooding for enhanced oil recovery in sandstone reservoirs. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 598, 124833. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2020.124833>
- [16] Elsaheed, S. M., Zaki, E. G., Omar, W. A., Ashraf Soliman, A., & Attia, A. M. (2021). Guar gum-based hydrogels as potent green polymers for enhanced oil recovery in high-salinity reservoirs. *ACS Omega*, 6(36), 23421-23431. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c03352>



- [17] Molnes, S. N., Mamonov, A., Paso, K. G., Strand, S., & Syverud, K. (2018). Investigation of a new application for cellulose nanocrystals: A study of the enhanced oil recovery potential by use of a green additive. *Cellulose*, 25, 2289-2301. <https://doi.org/10.1007/s10570-018-1715-5>
- [18] Yuan, J., Liu, D., Tian, Y., Tang, H., Wang, S., Song, J., & Jia, H. (2024). Novel insights to the effects of different modification groups on the enhanced oil recovery related properties of carboxyl nanocellulose at the crude oil/water interface. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 686, 133351. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2024.133351>
- [19] Logan, K. J., & Thomas, B. A. (1985). Distribution of lignin derivatives in plants. *New Phytologist*, 99(4), 571-585. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1985.tb03685.x>
- [20] Abbas, A. H., Pourafshary, P., Wan Sulaiman, W. R., Jaafar, M. Z., & Nyakuma, B. (2021). Toward reducing surfactant adsorption on clay minerals by lignin for enhanced oil recovery application. *ACS Omega*, 6(29), 18651-18662. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c01342>
- [21] He, Z., Wang, M., & Ma, S. (2024). Porous lignin-based composites for oil/water separation: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 260, 129569. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.129569>
- [22] Zhang, M., Wen, Y., Deng, Q., Xue, C., Ji, D., Gong, W., & Li, Y. (2024). Sustainable nanofluids constructed from size-controlled lignin nanoparticles: Application prospects in enhanced oil recovery. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 16(42), 46486-46496. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsaami.4c07918>
- [23] Alshehri, F. (2019). Production of polyhydroxybutyrate (PHB) by bacteria isolated from soil of Saudi Arabia. *Journal of Pure and Applied Microbiology*, 13(2), 897-904. <https://doi.org/10.22207/JPAM.13.2.26>
- [24] Lv, W., Wu, J., Ma, X., Xu, X., Wang, X., Zhu, J., [...] & Chen, J. (2024). Superhydrophobic polyurethane foam based on castor oil and lignin with SiC nanoparticles for efficient and recyclable oil-water separation. *Journal of Water Process Engineering*, 59, 104897. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.104897>
- [25] Kumar, P., Singh, M., Mehariya, S., Patel, S. K., Lee, J. K., & Kalia, V. C. (2014). Ecobiotechnological approach for exploiting the abilities of *Bacillus* to produce co-polymer of polyhydroxyalkanoate. *Indian Journal of Microbiology*, 54, 151-157. <https://doi.org/10.1007/s12088-014-0457-9>
- [26] Rivera, M. A. H., Morales, M. E. O., & Morales, A. M. (2019). Recuperación mejorada de petróleo asistida por microorganismos con capacidad de sintetizar biosurfactantes. *Emerging Trends in Education*, 5(15), 5-20. <https://doi.org/10.19136/jobs.a5n15.3569>
- [27] Salam, A. H., Alsaif, B., Hussain, S. M. S., Khan, S., Kamal, M. S., Patil, S., [...] & Hassan, A. M. (2024). Advances in understanding polymer retention in reservoir rocks: A comprehensive review. *Polymer Reviews*, 64(4), 1387-1413. <https://doi.org/10.1080/15583724.2024.2373925>
- [28] Musa, T. A., Ibrahim, A. F., Nasr-El-Din, H. A., & Hassan, A. M. (2021). New insights into guar gum as environmentally friendly polymer for enhanced oil recovery in high-salinity and high-temperature sandstone reservoirs. *Journal of Petroleum Exploration and Production*, 11(4), 1905-1913 <https://doi.org/10.1007/s13202-020-01080-3>
- [29] Lopez Sanchez, A. M. (2021). *Estudio de pre-factibilidad del método de inyección de soluciones poliméricas en recuperación mejorada al Campo los Cusis* [Tesis doctoral, Universidad Mayor de San Andrés]. <http://repositorio.umsa.bo/xmlui/handle/123456789/36355>
- [30] Correia, J. A. H. (2024). *Development of (bio) molecules' cocktails (including (bio) polymers and (bio) surfactants) to promote additional oil recovery* [Tesis doctoral, Universidade do Minho]. <https://hdl.handle.net/1822/89382>
- [31] Carvalho, R. T., da Silva Santos, A., Marques, A. M. T., Palermo, L. C., & Mansur, C. R. (2024). Experimental design to optimize the extraction and properties of an alternative gum from *Crotalaria Juncea* seeds. *Journal of Polymers and the Environment*, 32(4), 1837-1848. <https://doi.org/10.1007/s10924-023-03068-6>
- [32] Abou-alftooh, S. A., El-Hosiny, F. I., Ramzi, M., Mansour, E. M., Elnaggar, O. M., & El-hoshoudy, A. N. (2021). Chemical modification of guar by different synthetic vinyl monomers for enhancing oil recovery under severe sandstone reservoir conditions. *Egyptian Journal of Petroleum*, 30(3), 35-43. <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2021.07.001>
- [33] Perdana, R. H., Afridhol, M. K., Erfando, T., Setiawan, C., Saputra, I. D., & Adam, F. (2023, May). Biopolymer manufacturing from pectin extraction of jackfruit waste to increase oil production in EOR. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 1187, No. 1, p. 012003). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1187/1/012003>



- [34] El-Masry, J. F., Bou-Hamdan, K. F., Abbas, A. H., & Martyushev, D. A. (2023). A comprehensive review on utilizing nanomaterials in enhanced oil recovery applications. *Energies*, 16(2), 691. <https://doi.org/10.3390/en16020691>
- [35] Choque Guzmán, J. A. (2022). *Análisis de factibilidad de la inyección combinada de álcali-surfactante-polímero (ASP), para incrementar el factor de recuperación del Campo La Peña* [Tesis doctoral, Universidad Mayor de San Andrés]. Repositorio Institucional. <http://repositorio.umsa.bo/xmlui/handle/123456789/32113>
- [36] Lalji, S. M., Ali, S. I., & Asad, M. (2023). Experimental effect of biopolymers, synthetic and modified polymers on Western Pakistan shale (GHAZLI) stability. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 48(12), 16639-16653. <https://doi.org/10.1007/s13369-023-07737-5>
- [37] Madadi, R., Maljaee, H., Serafim, L. S., & Ventura, S. P. (2021). Microalgae as contributors to produce biopolymers. *Marine Drugs*, 19(8), 466. <https://doi.org/10.3390/md19080466>
- [38] Medrano Barboza, J. L. (2024). *Biorrefinería de microalgas: Una solución sostenible para el tratamiento de aguas residuales de origen industrial y la valorización energética de la biomasa obtenida* [Tesis de maestría, Universidad Rey Juan Carlos]. <https://burjcdigital.urjc.es/items/ae117298-6b01-48c5-af35-83ccf9a7d817>
- [39] Torres Martínez, J. G. (2020). *Síntesis y caracterización de un polímero hidrosoluble asociativo (PHA) para su aplicación en la recuperación mejorada de petróleo pesado* [Tesis doctoral, Universidad Nacional]. <https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/28551/TESIS%20JOSELINE%20GUADALUPE%20TORRES%20MARTINEZ%281%29.pdf?sequence=1>
- [40] Elhossary, D. A., Alameri, W., & Al-Shalabi, E. W. (2020, May). Experimental investigation of biopolymer rheology and injectivity in carbonates. In *Offshore Technology Conference*. OTC. <https://doi.org/10.4043/30680-MS>
- [41] Junin, R., & Agi, A. (2020, October). Experimental investigation of ultrasound-assisted weak-acid hydrolysis of crystalline starch nanoparticles for chemical enhanced oil recovery. In *Offshore Technology Conference Asia*. OTC. <https://doi.org/10.4043/30071-MS>
- [42] Huang, J., Zhong, C., & Yang, Y. (2020). Aggregating thermodynamic behavior of amphiphilic modified xanthan gum in aqueous solution and oil-flooding properties for enhanced oil recovery. *Chemical Engineering Science*, 216, 115476. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2020.115476>
- [43] Said, M., Haq, B., Al Shehri, D., Rahman, M. M., Muhammed, N. S., & Mahmoud, M. (2021). Modification of xanthan gum for a high-temperature and high-salinity reservoir. *Polymers*, 13(23), 4212. <https://doi.org/10.3390/polym13234212>
- [44] Gunaji, R. G., Junin, R., Bandyopadhyay, S., & Guttula, P. (2020). Production of biopolymer Schizophyllan using local sources in Malaysia. In *Offshore Technology Conference Asia*. OTC. <https://doi.org/10.4043/30156-MS>
- [45] El-hoshoudy, A. N. (2024). Assessment of biopolymers rheological properties and flooding results under reservoir conditions for enhanced oil recovery processes. *Egyptian Journal of Chemistry*, 67(9), 231-244. <https://doi.org/10.21608/ejchem.2024.258404.9090>
- [46] Rock, A., Hincapie, R. E., Tahir, M., Langanke, N., & Ganzer, L. (2020). On the role of polymer viscoelasticity in enhanced oil recovery: Extensive laboratory data and review. *Polymers*, 12(10), 2276. <https://doi.org/10.3390/polym12102276>
- [47] Keykhosravi, A., Vanani, M. B., & Aghayari, C. (2021). TiO₂ nanoparticle-induced Xanthan Gum Polymer for EOR: Assessing the underlying mechanisms in oil-wet carbonates. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 204, 108756. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.108756>
- [48] Rellegadla, S., Jain, S., Sangwai, J. S., Lavania, M., Lal, B., Gieg, L., [...] & Agrawal, A. (2021). Wettability alteration of the oil-wet carbonate by viscosity-augmented guar galactomannan for enhanced oil recovery. *ACS Applied Polymer Materials*, 3(4), 1983-1994. <https://doi.org/10.1021/acscapm.1c00059>
- [49] Dennar, L., Amro, M., Kummer, N. A., Arochukwu, E., Suleiman, A., & Ekpeyong, O. (2021). Exploring the suitability of polymer injection in the Niger delta sands using 3-D simulation and experimental analysis-a case study. In *SPE Nigeria Annual International Conference and Exhibition*. SPE. <https://doi.org/10.2118/207093-MS>
- [50] Zainal, S., Razali, N., & Rodzali, M. A. (2023). Graphene nanoplatelets for extended lifetime of scale inhibitor squeeze treatment in high temperature reservoirs. In *SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition*. SPE. <https://doi.org/10.2118/215228-MS>



- [51] Clinckspoor, K. J., Sousa-Ferreira, V. H. D., & Barros-Zanoni-Lopes-Moreno, R. (2021). Bulk rheology characterization of biopolymer solutions and discussions of their potential for enhanced oil recovery applications. *CT&F-Ciencia, Tecnología y Futuro*, 11(1), 123-135. <https://doi.org/10.29047/01225383.367>
- [52] Elhossary, D. A., Sebastian, A., Alameri, W., & Al-Shalabi, E. W. (2021, December). Bulk rheology and injectivity assessments of potential biopolymer and synthetic polymer for applications in carbonates under harsh conditions. In *Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference* (p. D0315068R003). SPE. <https://doi.org/10.2118/208105-MS>
- [53] Carpenter, C. (2021). Cellulose nanocrystal switchable gel improves CO2 sweep efficiency. *Journal of Petroleum Technology*, 73(11), 58-59. <https://doi.org/10.2118/1121-0058-JPT>
- [54] Xu, L., Liu, X., Ding, H. Y., Zhang, H., Liu, L., Li, J. H., [...] & Dong, M. Z. (2023). Temperature/salt tolerance and oil recovery of xanthan gum solution enhanced by surface-modified nanosilicas. *Petroleum Science*, 20(1), 577-589. <https://doi.org/10.1016/j.petsci.2022.08.020>
- [55] Abbas, A. H., Zhuniskenov, Y., Serikov, G., Nyah, F., Ridzuan, N., Gbonhinbor, J., & Agi, A. (2024, August). Navigating the future: A numerical study of natural polymers and CO2 in offshore applications. In *SPE Nigeria Annual International Conference and Exhibition*. SPE. <https://doi.org/10.2118/221614-MS>
- [56] He, S., Zhang, M., Chen, B., Wei, X., & Su, X. (2024). Modification of Welan gum with poly (2-oxazoline) to obtain thermoviscosifying polymer for enhanced oil recovery. *International Journal of Biological Macromolecules*, 263, 130193. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.130193>
- [57] Massarweh, O., & Abushaikha, A. S. (2024). Towards environmentally sustainable oil recovery: The role of sustainable materials. *Energy Reports*, 12, 95-119. <https://doi.org/10.1016/j.egyrs.2024.06.013>
- [58] Habib, S. H., Yunus, R., Zakaria, R., Biak, D. R. A., Jan, B. H. M., & Amir, Z. (2024). Chemical enhanced oil recovery: Synergetic mechanism of alkali, surfactant and polymer with overview of methyl ester sulfonate as a green alternative for EOR surfactant. *Fuel*, 363, 130957. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.130957>
- [59] Liao, Y., Jin, J., Du, S., Ren, Y., & Li, Q. (2024). Research on performance evaluation of polymeric surfactant cleaning gel-breaking fluid (GBF) and its enhanced oil recovery (EOR) effect. *Polymers*, 16(3), 397. <https://doi.org/10.3390/polym16030397>
- [60] Al_Ani, M., Sidek, M. A., Jaafar, M. Z., Agi, A., Gbonhinbor, J., Ridzuan, N., [...] & Oseh, J. (2023, July). Application of lignin polymeric nanofluid as a chemical enhanced oil recovery agent at reservoir condition. In *SPE Nigeria Annual International Conference and Exhibition*. SPE. <https://doi.org/10.2118/217132-MS>
- [61] Ramadhan, R., Abdurahman, M., & Srisuriyachai, F. (2020). Sensitivity analysis comparison of synthetic polymer and biopolymer using reservoir simulation. *Scientific Contributions Oil and Gas*, 43(3), 143-152. <https://doi.org/10.29017/scog.43.3.516>
- [62] Muhammed, N. S., Haq, M. B., Al-Shehri, D., Rahaman, M. M., Keshavarz, A., & Hossain, S. Z. (2020). Comparative study of green and synthetic polymers for enhanced oil recovery. *Polymers*, 12(10), 2429. <https://doi.org/10.3390/polym12102429>
- [63] Gowthaman, N. S. K., Lim, H. N., Sreeraj, T. R., Amalraj, A., & Gopi, S. (2021). Advantages of biopolymers over synthetic polymers: Social, economic, and environmental aspects. In *Biopolymers and their industrial applications* (pp. 351-372). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819240-5.00015-8>
- [64] Mtibe, A., Motloung, M. P., Bandyopadhyay, J., & Ray, S. S. (2021). Synthetic biopolymers and their composites: Advantages and limitations—An overview. *Macromolecular Rapid Communications*, 42(15), 2100130. <https://doi.org/10.1002/marc.202100130>
- [65] Reddy, M. S. B., Ponnamma, D., Choudhary, R., & Sadasivuni, K. K. (2021). A comparative review of natural and synthetic biopolymer composite scaffolds. *Polymers*, 13(7), 1105. <https://doi.org/10.3390/polym13071105>
- [66] Hahn, S., & Hennecke, D. (2022, May). *Final Report WP4—Comparison between natural and synthetic polymers* [Technical report]. German Environment Agency. <https://cefic-iri.org/wp-content/uploads/2022/07/EC052-WP4-Report-polymer-Final.pdf>
- [67] Ortiz Suarez, M. A. (2022). *Reducción del impacto ambiental de la industria petrolera en Bolivia mediante la implementación de Nanotecnología* [Tesis doctoral, Universidad Mayor de San Andrés]. Repositorio Institucional – Universidad Mayor de San Andrés. <https://repositorio.umsa.bo/handle/123456789/36360>

- [68] Hu, Z., Nourafkan, E., Gao, H., & Wen, D. (2017). Microemulsions stabilized by in-situ synthesized nanoparticles for enhanced oil recovery. *Fuel*, 210, 272-281. <https://doi.org/10.34726/hss.2024.114641>
- [69] Arumanatharayil, J. J. (2024). *Exploring the effectiveness of biosurfactant in enhancing oil recovery and reducing environmental impact in oil and gas industry* [Tesis doctoral, Technische Universität Wien]. TU Wien Academic Press. <https://doi.org/10.34726/hss.2024.114641>
- [70] Ali, A. G., Amao, A. M., & Moawad, T. M. (2024). Citrus-based biopolymer for enhanced oil recovery applications in high-salinity, high-temperature reservoirs. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 49(6), 8643-8659. <https://doi.org/10.1007/s13369-023-08619-6>
- [71] Castro, R. H., Corredor, L. M., Llanos, S., Causil, M. A., Arias, A., Pérez, E., [...] & Cortés, F. B. (2024). Experimental investigation of the viscosity and stability of scleroglucan-based nanofluids for enhanced oil recovery. *Nanomaterials*, 14(2), 156. <https://doi.org/10.3390/nano14020156>
- [72] Chaturvedi, K. R., Narukulla, R., Goswami, R. R., & Sharma, T. (2024). Challenges, opportunities, and the way ahead in polymer flooding. In *Advancements in chemical enhanced oil recovery* (1st ed., pp. 61–84). Apple Academic Press. <https://doi.org/10.1201/9781003453727-4>
- [73] Maleki, M., Kazemzadeh, Y., Dehghan Monfared, A., Hasan-Zadeh, A., & Abbasi, S. (2024). Bio-enhanced oil recovery (BEOR) methods: All-important review of the occasions and challenges The Canadian Journal of Chemical Engineering. <https://doi.org/10.1002/cjce.25216>
- [74] Khan, I., Saeed, K., & Khan, I. (2019). Nanoparticles: Properties, applications and toxicities. *Arabian Journal of Chemistry*, 12(7), 908-931. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2017.05.011>
- [75] Qamar, S. A., Junaid, M., Riasat, A., Jahangeer, M., Bilal, M., & Mu, B. Z. (2024). Carrageenan-based hybrids with biopolymers and nano-structured materials for biomimetic applications. *Starch-Stärke*, 76(1-2), 2200018. <https://doi.org/10.1002/star.202200018>
- [76] Mumtaz, M., Hussain, N., Ashraf, M., Azam, H. M. H., & Iftikhar, A. (2024). Introduction to biopolymers, their blend, IPNs, gel, composites, and nanocomposites. In *Applications of Biopolymers in Science, Biotechnology, and Engineering* (pp. 1-29). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119783473.ch1>
- [77] Wu, B., Xiu, J., Yu, L., Huang, L., Yi, L., & Ma, Y. (2022). Research advances of microbial enhanced oil recovery. *Heliyon*, 8(11), e11367. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11424>
- [78] Pandey, A., Qamar, S. F., Das, S., Basu, S., Kesarwani, H., Saxena, A., [...] & Sarkar, J. (2024). Advanced multi-wall carbon nanotube-optimized surfactant-polymer flooding for enhanced oil recovery. *Fuel*, 355, 129463. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.129463>
- [79] Tackie-Otoo, B. N., Mohammed, M. A. A., Yekeen, N., & Negash, B. M. (2020). Alternative chemical agents for alkalis, surfactants and polymers for enhanced oil recovery: Research trend and prospects. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 187, 106828. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106828>
- [80] Matovanni, M. P. N., Ikhsanudin, M. N., Arvianto, R. I., Waluyo, J., Distantina, S., Kaavessina, M., & Pranolo, S. H. (2023). The prospects and challenges of biopolymers for enhanced oil recovery (EOR). *Equilibrium Journal of Chemical Engineering*, 7(1), 78-86. <https://jurnal.uns.ac.id/equilibrium/article/view/73947>
- [81] Xia, S., Zhang, L., Davletshin, A., Li, Z., You, J., & Tan, S. (2020). Application of polysaccharide biopolymer in petroleum recovery. *Polymers*, 12(9), 1860. <https://doi.org/10.3390/polym12091860>
- [82] Abdulrahman, J., Ebhota, W. S., & Tabakov, P. Y. (2024). Biopolymer composite materials in oil and gas sector. *International Journal of Polymer Science*, 2024(1), 8584879. <https://doi.org/10.1155/2024/8584879>
- [83] Osorio, S. E. T., Arias, C. J. Y., Laguaquiza, J. S. E., & Molina, J. C. T. (2024). Soluciones energéticas sostenibles: un estudio sobre estrategias para el uso de gas asociado a la extracción de petróleo en la industria ecuatoriana. *AlfaPublicaciones*, 6(2), 52-72. <https://doi.org/10.33262/ap.v6i2.467>

De residuos a biopolímeros: fermentación anaeróbica como ruta sostenible para la producción de polihidroxicanoatos

Rolando Calero¹, Gerardo Herrera¹

¹Universidad Estatal Península de Santa Elena, Facultad de Ciencias de la Ingeniería.

*Autor de correspondencia/ corresponding author, email: rcalero@upse.edu.ec

From waste to biopolymers: anaerobic fermentation as a sustainable pathway for polyhydroxyalkanoates production

Resumen

Los polihidroxicanoatos (PHA) son biopolímeros que han ganado relevancia por su biodegradabilidad y su potencial para reemplazar plásticos convencionales, lo que los convierte en una solución prometedora para mitigar la contaminación plástica. La producción de PHA a partir de ácidos grasos volátiles (AGV), obtenidos mediante el tratamiento anaeróbico de residuos, se presenta como una alternativa sostenible y respetuosa con el medio ambiente frente a las rutas tradicionales de producción. Este artículo analiza el tratamiento anaeróbico de diversos residuos, como glicerol, aceite de palma, bagazo de frutas y vegetales, suero de leche y melaza, con el objetivo de generar AGV. Se evalúan estos sustratos por su disponibilidad, bajo costo y compatibilidad con procesos biotecnológicos sostenibles. Además, se discuten las ventajas y limitaciones de cada sustrato, junto con las condiciones óptimas de operación para maximizar la conversión de los residuos en AGV, con implicaciones significativas para el desarrollo de biorrefinerías integradas y la valorización de residuos en la industria del PHA.

Palabras claves: ácidos grasos volátiles, polihidroxicanoatos, biomasa, biorreactores, microorganismos acidogénicos.

Abstract

Polyhydroxyalkanoates (PHAs) are types of biopolymers that are becoming important because they can break down naturally and could replace regular plastics, which makes them a hopeful way to reduce plastic waste. The production of PHAs from volatile fatty acids (VFAs), generated through anaerobic waste treatment, offers a sustainable and environmentally friendly alternative to traditional production routes. This article examines the anaerobic treatment of various waste substrates, such as glycerol, palm oil, fruit and vegetable bagasse, whey, and molasses, aiming to produce VFAs. These substrates are evaluated based on their availability, low cost, and compatibility with sustainable biotechnological processes. Furthermore, the advantages and limitations of each substrate are discussed, along with the optimal operational conditions to maximize waste conversion into VFAs. The research holds significant implications for the development of integrated biorefinery systems and waste valorization in the PHA industry.

Keywords: volatile fatty acids, polyhydroxyalkanoates, biomass, bioreactors, acidogenic microorganisms



Licencia Creative Commons
Atribución-NoComercial 4.0



Editado por /
Edited by:
Sebastián Ponce

Recibido /
Received:
18/10/2024

Aceptado /
Accepted:
10/12/2024

Publicado en línea /
Published online:
03/10/2025

INTRODUCCIÓN

La creciente demanda global por productos agrícolas y agroindustriales ha intensificado la generación de grandes volúmenes de aguas residuales. Estas corrientes líquidas, ricas en materia orgánica, representan un desafío ambiental significativo si no se gestionan adecuadamente. Sin embargo, en ellas se esconde un potencial económico y medioambiental considerable [1]. La valorización de estas aguas residuales, mediante procesos biológicos, se presenta como una alternativa prometedora para mitigar los impactos ambientales y generar productos de alto valor agregado [2].

La industria agroalimentaria, en particular, genera una diversidad de aguas residuales con características particulares [3]. Entre ellas se destacan los efluentes de la industria azucarera y los provenientes de la producción láctea, ricos en compuestos carbonosos complejos. Estos compuestos orgánicos pueden ser transformados por bacterias acidogénicas en ácidos grasos volátiles (AGV), como el ácido propiónico, ácido butírico y ácido valérico [4]. La generación de AGV encuentra aplicaciones en diversas industrias, desde la química hasta la farmacéutica [5]. No obstante, la implementación de tecnologías de valorización biológica actualmente se enfrenta a desafíos importantes como serían la variabilidad en la composición de las aguas residuales, la optimización de los procesos biológicos y la evaluación de la viabilidad económica [6].

Según datos de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO por sus siglas en inglés), se estima que la agroindustria genera aproximadamente el 30-40 % de todas las aguas residuales industriales a nivel mundial [7]. Lo que anualmente representa una producción de alrededor de 380 mil millones de metros cúbicos de aguas residuales agroindustriales. Por ejemplo, la industria láctea produce entre 0,2 a 10 litros de aguas residuales por litro de leche procesada con una carga orgánica típica: 2 000-5 000 mg/L de DQO (Demanda Química de Oxígeno)[8]. En la industria azucarera la producción es de aproximadamente 1 500-2 000 litros de aguas residuales por tonelada de caña procesada; lo que representa una carga orgánica de entre 1 500 a 3 000 mg/L de DQO [9]. Como último ejemplo, está la industria cárnica, que genera entre 10-20 m³ de aguas residuales por tonelada de producto con una carga orgánica de entre 2 000 a 6 000 mg/L de DQO [10].

Tomando en cuenta esta información, el impacto ambiental es inmenso ya que se estima que solo el 8 % de las aguas residuales industriales en países de bajos ingresos reciben algún tratamiento y en países de ingresos medios, este porcentaje aumenta al 28 % [11]. En la última década la generación de aguas residuales agroindustriales ha aumentado un 15-20 % debido al crecimiento de la industria [12].

Las investigaciones actuales sobre la valorización de aguas residuales agroindustriales mediante la producción de ácidos grasos volátiles (AGV) abarcan un cuerpo extenso de estudios centrados en la caracterización de diversas fuentes de residuos, la identificación de cepas bacterianas acidogénicas relevantes, así como en la determinación de los factores operativos que afectan la eficiencia de producción de AGV y la selección de tecnologías de tratamiento óptimas. Asimismo, se analizan los principales desafíos y oportunidades que enfrentan estas tecnologías, destacando escenarios y proyecciones para su implementación futura. En este contexto, el propósito de esta revisión es aportar evidencia crítica y actualizada que respalde el diseño de estrategias sostenibles



orientadas a la gestión integral de aguas residuales agroindustriales y a la obtención de bioproductos de alto valor añadido.

METODOLOGÍA

Se llevó a cabo una revisión sistemática para sintetizar la evidencia científica disponible sobre la valorización de aguas residuales agroindustriales mediante la producción de ácidos grasos volátiles (AGV). Con el objetivo de responder a la pregunta de investigación: ¿Cuáles son las tecnologías y estrategias más efectivas para la producción de AGV a partir de aguas residuales agroindustriales, y cuáles son los factores que influyen en su rendimiento? Se diseñó el siguiente protocolo de investigación:

Se escogieron como criterios de inclusión estudios originales que presentaran investigaciones experimentales o de modelado relacionadas con la producción de AGV a partir de aguas residuales agroindustriales; artículos publicados en revistas científicas indexadas con disponibilidad del texto completo; estudios publicados entre 2013 y 2023 para garantizar la relevancia y actualidad de la evidencia científica y, por último, se escogieron investigaciones que evalúan tecnologías y estrategias de producción de AGV y/o los factores que afectan su rendimiento.

Como criterios de exclusión, se evitaron estudios no relacionados directamente con la producción de ácidos grasos volátiles a partir de aguas residuales; revisiones bibliográficas, opiniones de expertos, resúmenes de congresos, capítulos de libros y documentos no revisados por pares; artículos en los que no fue posible acceder al texto completo y estudios publicados antes de 2013, además de trabajos que no proporcionaban datos cuantitativos o cualitativos relevantes sobre la eficiencia o los factores que influyen en la producción de AGV.

En relación con la estrategia de búsqueda, se realizó una revisión exhaustiva en las bases de datos Scopus, Web of Science, PubMed y Google Scholar. Fueron seleccionados únicamente estudios originales derivados de investigaciones experimentales o de modelado enfocados en la producción de ácidos grasos volátiles (AGV) a partir de aguas residuales de origen agroindustrial. Se estableció como criterio de inclusión que los artículos estuvieran publicados en revistas científicas indexadas, con acceso a texto completo, y que correspondieran a publicaciones de los últimos diez años. Estudios duplicados, revisiones narrativas, resúmenes sin texto completo o documentos no sometidos a revisión por pares fueron excluidos.

RESULTADOS

El estudio sobre el uso de diversas fuentes de carbono económicamente viables representa una estrategia prometedora para reducir significativamente los costos de producción de biopolímeros, en particular los polihidroxialcanoatos (PHA). La evaluación de la viabilidad económica de diferentes sustratos de carbono es un aspecto fundamental en este contexto, incluyendo fuentes como las melazas de caña de azúcar y remolacha, el suero lácteo, los aceites vegetales, los hidrolizados de almidón (maíz y tapioca), así como la celulosa y la hemicelulosa.

En general, estos sustratos requieren un proceso de acidificación para la generación de ácidos grasos volátiles (AGV), los cuales pueden ser utilizados posteriormente como precursores en la biosíntesis de PHA por diversos microorganismos, predominantemente aerobios. En este sentido, resulta fundamental un análisis detallado sobre el origen y la composición de estos sustratos, así como su impacto en los costos de producción y la eficiencia del proceso. Además, se debe considerar la evaluación del rendimiento bajo distintas condiciones operativas, las implicaciones económicas asociadas al uso de estos sustratos y la eficiencia de los métodos de recuperación empleados en la obtención de PHA.

Tipos de residuos para producir ácidos grasos volátiles (AGV)

Uno de los objetivos de la fermentación acidogénica de aguas residuales de diferentes fuentes es la de servir como primer escalón en el proceso de producción de PHA a partir de cultivos mixtos microbianos. Los ácidos grasos volátiles o AGV se generan en un proceso anaeróbico que implica hidrólisis y acidogénesis (esta última también se conoce como fermentación acidogénica o fermentación oscura), como se ilustra en la Figura 1. En la hidrólisis, las enzimas excretadas por los microorganismos hidrolíticos descomponen los polímeros orgánicos complejos de los residuos en monómeros orgánicos más simples. Posteriormente, los acidógenos fermentan estos monómeros en AGV principalmente, como acético, propiónico, butírico y valérico. En ambos procesos interviene un complejo consorcio de anaerobios facultativos obligados, como *Bacteroides*, *Clostridia*, *Bifidobacterium*, *streptococcus* y Enterobacteriaceae. En las últimas décadas, se han dedicado numerosos esfuerzos para maximizar la producción de AGV explorando diferentes tipos de residuos y optimizando las condiciones de funcionamiento. Ahora se sabe que es posible manipular el tipo de AGV producidos, lo que es fundamental para el rendimiento de las aplicaciones posteriores, como la producción de PHA, electricidad, biogás y eliminación biológica del fósforo y el nitrógeno de las aguas residuales [4].

Existe, por lo tanto, un potencial de generación de AGV a partir de diversos residuos sólidos y líquidos. Los lodos, los residuos alimentarios y la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos son los tres residuos sólidos más investigados, mientras que las aguas residuales generadas por las industrias agrícola, láctea, papelera y de la pasta de papel son los residuos líquidos más utilizados para la producción de AGV [13]. En estos procesos es importante que el contenido de amonio de los residuos sea inferior a 5000 mg/L para evitar la inhibición de la producción de AGV. Aparte de las características de los residuos, hay que tener en cuenta la disponibilidad y la cantidad de residuos generados para garantizar un suministro continuo y estable de residuos para producir AGV.

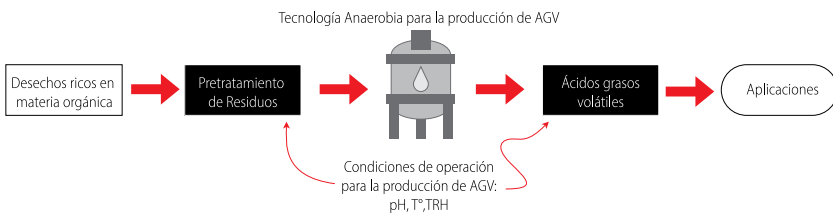


Figura 1. Esquema del proceso de conversión de residuos agroindustriales en ácidos grasos volátiles (AGV).



Aplicaciones de los ácidos grasos Volátiles derivados de residuos de aguas residuales

Los ácidos grasos volátiles (AGV) generados mediante la fermentación acidogénica de residuos representan un sustrato de alto valor para diversas aplicaciones industriales y ambientales [14]. Además de su aprovechamiento en la producción de bioplásticos, los AGV pueden ser utilizados en procesos de generación de bioenergía y en la eliminación biológica de nutrientes. En numerosos casos, los efluentes fermentados ricos en AGV pueden emplearse de forma directa; no obstante, ciertas aplicaciones requieren tratamientos adicionales con el fin de optimizar la eficiencia del proceso y garantizar la calidad del producto final.

Antes de que los residuos fermentados puedan utilizarse para la producción de PHA, es importante regular el contenido de amonio y fósforo, ya que un exceso de nutrientes favorecería el crecimiento de microorganismos y reduciría la conversión de AGV en PHA [15]. Se conoce que las condiciones de nitrógeno y fósforo podrían conducir a un mayor contenido y rendimiento de PHA. El exceso de nitrógeno y fósforo presente en los residuos fermentados puede eliminarse con una pérdida insignificante de AGV mediante el uso de técnicas eficaces donde los residuos fermentados deben filtrarse antes de su utilización.

La obtención de PHA obtenido mediante microorganismos puros es mayor (Tabla 1), pero se requieren condiciones de esterilización, lo que anularía el objetivo principal de reducir el costo de producción de PHA, ya que implica un aporte adicional de energía y equipos. Por el contrario, la producción de PHA mediante cultivos mixtos elimina la necesidad de esterilización y, por tanto, es una vía de producción de AGV derivados de residuos más viable económicamente. El contenido de PHA obtenido a partir de cultivos mixtos puede mejorarse optimizando las condiciones operativas del reactor de cultivo de los microorganismos acumuladores de PHA [16] mediante la alimentación del tipo de AGV adecuado y/o el ajuste fino de las condiciones de producción de PHA. Con esta estrategia, se puede lograr un contenido de PHA en un rango de 40-70 % mediante cultivos microbianos mixtos alimentados con residuos de alimentos fermentados, lodos activados con residuos fermentados, melazas de caña de azúcar fermentadas y efluentes de papeleras fermentados [17].

La longitud de la cadena de los AGV tiene una gran influencia en la composición y, por tanto, en las propiedades mecánicas y la aplicación del PHA resultante. En la producción de PHA de cultivo mixto, los ácidos acético y butírico favorecen la producción de 3-hidroxiobutirato (3HB), mientras que los ácidos propiónico y valérico promueven la síntesis de 3-hidroxi valerato (3HV). El poli(3-hidroxiobutirato) (P(3HB)) es quebradizo y rígido, por lo que sus aplicaciones son limitadas. La incorporación de 3HV da lugar a la formación del copolímero P(3HB-co-3HV), que es más flexible y duro [18]. Además, es menos permeable al oxígeno que el polietileno y el polipropileno comerciales, lo que lo convierte en un material adecuado para el envasado de alimentos. Por lo tanto, es esencial regular la composición de AGV durante la fermentación acidogénica para facilitar la producción de PHA con las propiedades deseadas [19].

TABLA 1. Contenido máximo de polihidroxialcanoatos (PHA) (% p/p) producido por cultivos microbianos puros y mixtos utilizando ácidos grasos volátiles (AGV) derivados de diferentes residuos [4].

Fuentes de ácidos grasos volátiles	Cultivos microbianos	Contenido de PHA en porcentaje peso
Aguas residuales de almidón fermentado	<i>Alcaligenes eutrophus</i>	34
Efluentes de aceite de palma fermentado	<i>Ralstonia eutropha</i>	>90
Aguas residuales de papeleras fermentadas	Lodos activos	48
Efluente de madera fermentada	Lodos activados	29
Melaza de caña de azúcar fermentada	Lodos activados	37-75
Lodos activados de residuos fermentados	Lodos activados	57-73
Residuos de alimentos fermentados	Lodos activados	40
Residuos alimentarios fermentados y lodos de depuradora	Lodos activados	48

Residuos biológicos y rutas fermentativas

La selección del sustrato desempeña un papel fundamental en la eficiencia del proceso de producción, determinando tanto la composición de los ácidos grasos volátiles (AGV) generados como las propiedades finales del polihidroxialcanoato (PHA) obtenido. La optimización de estos sustratos es, por tanto, un aspecto clave para avanzar hacia una producción de biopolímeros más sostenible y económicamente viable.

En este contexto, es esencial evaluar diversas fuentes de carbono y sus implicaciones en la fermentación anaeróbica, con el objetivo de mejorar el rendimiento del proceso y la calidad del biopolímero resultante. A continuación, se presentan algunos de los sustratos más relevantes en este ámbito:

Glicerol

El glicerol es el principal subproducto de la industria del biodiésel [20]. Dado que la producción de biodiésel ha aumentado drásticamente desde 2007 [21], el glicerol crudo generado a partir de la transesterificación del aceite vegetal también se ha producido en grandes cantidades. Publicaciones recientes [22] han descrito que la fermentación directa de biodiésel-glicerol a PHB por *Cupriavidus necator* puede llegar a una producción del biopolímero cercana al 50 % de la biomasa microbiana seca.

Las muestras de glicerol crudo provenientes de diferentes fabricantes presentan variaciones significativas en su composición, especialmente en el contenido de sales como NaCl o K₂SO₄, así como en la presencia de metanol, ácidos grasos y el pH, que depende del proceso de producción aplicado. Estos contaminantes pueden acumularse durante el curso de la fermentación, afectando potencialmente el crecimiento microbiano y la síntesis de poli(3-hidroxibutirato) (PHB) [23].



No obstante, a pesar de estas diferencias, todas las materias primas evaluadas contienen glicerol como componente principal, acompañado de cantidades residuales muy bajas de jabones y ésteres metílicos de ácidos grasos. En un estudio realizado se analizaron muestras con una composición de 40 % de glicerol y 34 % de jabones y ésteres metílicos de ácidos grasos, demostrando que estos componentes son sustratos de carbono preferidos por cepas de *Pseudomonas*, un grupo de bacterias que difiere significativamente de los típicos productores de PHA [24].

En fermentaciones de alta densidad celular, los contaminantes (NaCl o K_2SO_4), podrían acumularse hasta alcanzar concentraciones inhibitorias. Bacterias como *Paracoccus denitrificans* y *Cupriavidus necator* JMP 134, acumulan polihidroxibutirato (PHB) a partir de glicerol puro hasta un contenido del 70 % de la masa seca celular. Cuando se utilizó glicerol crudo que contenía 5,5 % de NaCl , se observó un contenido se reducía a un 48 % de PHB de una masa seca bacteriana de 50 g/L. Además, el coeficiente de rendimiento de PHB se redujo, obviamente debido a la osmorregulación. El efecto del glicerol contaminado con K_2SO_4 fue menos pronunciado.

Para examinar usos alternativos para el glicerol de desecho de biodiesel de bajo valor, se realizaron inicialmente fermentaciones a pequeña escala por *Burkholderia cepacia* en matraces agitados y se analizó la producción de PHB utilizando glicerol como fuente de carbono. Se determinaron las propiedades fisicoquímicas del PHB producido por *B. cepacia* cultivado en glicerol de grado reactivo, estableciéndose que la masa molecular disminuye cuando se utiliza glicerol como fuente de carbono. Posteriormente *B. cepacia* se utilizó para convertir biodiésel-glicerol en PHB mediante fermentación a escala de planta piloto (200 L).

Se ha observado que el uso de glicerol derivado del biodiésel como única fuente de carbono en cultivos agitados permite a *Burkholderia cepacia* producir 5.8 g/L de biomasa seca, con un contenido de poli(3-hidroxibutirato) (PHB) de hasta el 81,9 % del peso seco total. Comparada con *Escherichia coli* y diversas cepas de *Pseudomonas* cultivadas en glicerol, *B. cepacia* mostró una mayor producción de biomasa y PHA [25]. Sin embargo, un incremento en la concentración de glicerol del 3 % al 9 % (v/v) resultó en una disminución cercana al 50 % en la biomasa producida por *B. cepacia*.

De manera similar, estudios realizados con *Cupriavidus necator* indicaron que concentraciones elevadas de glicerol (>30 g/L) también redujeron significativamente la tasa de crecimiento específico de esta cepa. Adicionalmente, investigaciones recientes con *Pseudomonas oleovorans* y *Pseudomonas corrugata* demostraron que estas especies pueden sintetizar poli(3-hidroxibutirato) (P3HB) y polihidroxialcanoatos de longitud de cadena media (mcl-PHA) a partir de glicerol. Los mcl-PHA sintetizados estaban compuestos principalmente de ácido 3-hidroxidecanoico (C10:0; 44 ± 2 mol %) y ácido 3-hidroxidecanoico (C12:1; 31 ± 2 mol %), respectivamente, a concentraciones de glicerol de hasta el 5 % (v/v). En *P. oleovorans*, la productividad celular alcanzó un máximo del 40 % en glicerol al 5 % (v/v), mientras que en *P. corrugata* fue del 20 % con glicerol al 2 % (v/v) tras 72 horas de cultivo [26].

Es importante destacar que el aumento de la concentración de glicerol en el medio, del 1 % al 5 % (v/v), provocó una disminución significativa en la masa molar (M_n) de los polímeros, con reducciones del 61 % en el P3HB y del 72 % en el mcl-PHA. No obstante, los patrones



de crecimiento observados para *P. oleovorans* y *P. corrugata* sugieren la posibilidad de utilizarlas en cultivos mixtos para obtener mezclas naturales de P3HB y mcl-PHA.

Por otro lado, estudios con *B. cepacia* ATCC 17759 confirmaron que concentraciones de glicerol entre el 3 % y el 9 % (v/v) favorecen la producción de PHB. Sin embargo, cuando el glicerol se usó como fuente secundaria de carbono, junto con xilosa como fuente primaria, la masa molecular del PHB disminuyó, dependiendo tanto del tiempo de adición como de la concentración del glicerol [27].

El uso de la cepa *Zobellella denitrificans* para la producción de poli(3-hidroxibutirato) (PHB) ha sido objeto de estudio a partir de glicerol como única fuente de carbono [28]. Para esto se utilizó un equipo de fermentación a escala piloto (42 litros) para aumentar la alta capacidad de acumulación de PHB de esta cepa. Mediante el cultivo por lotes alimentados (Fed-Batch reactors), al principio se obtuvo una densidad celular relativamente alta ($29,9 \pm 1,3$ g/L) durante un breve periodo de fermentación (24 horas). Sin embargo, el contenido en PHB era relativamente bajo ($31,0\% \pm 4,2\%$ [peso/peso]). Posteriormente, se obtuvieron concentraciones mucho más elevadas de PHB (hasta $54,3 \pm 7,9$ g/L) y densidades celulares más altas (hasta $81,2 \pm 2,5$ g/L) mediante una optimización adicional de la alimentación por lotes en presencia de 20 g/L de NaCl, con una alimentación optimizada de glicerol y amoníaco para favorecer tanto el crecimiento celular como la acumulación de polímeros durante un periodo de 50 horas. Se alcanzó una tasa de crecimiento específico elevada (0,422/h) y un tiempo de duplicación corto (1,64 horas). El contenido máximo de PHB alcanzado fue del $66,9\% \pm 7,6\%$ del peso seco celular. La productividad volumétrica máxima de polímero fue de $1,09 \pm 0,16$ g/L/h, mientras que el coeficiente de rendimiento de sustrato fue de $0,25 \pm 0,04$ g PHB/g glicerol. La recuperación máxima de PHB ($85,0\% \pm 0,10\%$ p/p) se obtuvo tras 72 horas de extracción con cloroformo a 30 °C, logrando una pureza del polímero del $98,3\% \pm 1,3\%$.

Por último también se investigó el uso de cepas microbianas mixtas abiertas, estudiando flujos de residuos como materia prima para el proceso de producción de PHA con el fin de valorizar los residuos orgánicos y reducir los costos de producción de PHA observando el efecto de la duración de los ciclos del reactor en el proceso de enriquecimiento bacteriano haciendo énfasis en la distribución de glicerol hacia PHA y poliglucosa con dos reactores discontinuos secuenciados (Sequencing Batch Reactors, SBR) operando con el mismo tiempo de retención hidráulica y de biomasa [29]. Una longitud de ciclo corta (6 horas) favoreció la producción de poliglucosa frente a la de PHA, mientras que a una longitud de ciclo larga (24 horas) se favoreció más la de PHA. En ambas comunidades parecía dominar el mismo microorganismo, lo que sugiere una respuesta metabólica más que de competencia microbiana.

Diversos estudios han evaluado el potencial de cultivos bacterianos seleccionados para metabolizar fracciones de glicerol y metanol presentes en glicerol crudo [30]. Sin embargo, en el presente estudio se observó que el glicerol actuó como la única fuente de carbono que contribuyó a la acumulación de dos biopolímeros: polihidroxibutirato (PHB) y un biopolímero de glucosa (GB). Los resultados obtenidos muestran que el cultivo alcanzó un contenido máximo de PHB del 47 % del peso celular seco, con una productividad de 0,27 g/L-d, empleando cultivos mixtos aerobios y un sustrato de desecho real con materia orgánica compuesta por ácidos grasos no volátiles.



Cabe destacar que el uso de glicerol crudo como sustrato permite la producción de PHA sin la necesidad de etapas previas de pretratamiento. Esta característica confiere al proceso una ventaja significativa en términos de viabilidad económica, al reducir los costos operativos y mejorar la competitividad del biopolímero en el mercado.

Residuos lignocelulósicos

En la última década, ha crecido significativamente el interés en la investigación sobre el aprovechamiento de materiales de origen biológico recuperados de la biomasa residual. Este enfoque se centra en la utilización de bioproductos extraídos, recuperados y/o sintetizados para aplicaciones industriales esenciales, alineadas con los objetivos de sostenibilidad dentro de una bioeconomía futura. En particular, el uso eficiente de materias primas derivadas de la biomasa, especialmente aquellas provenientes de materiales lignocelulósicos (biomasa vegetal compuesta principalmente de celulosa, hemicelulosa y lignina), representa un área clave de innovación. Estas materias primas tienen un alto potencial para aplicaciones a gran escala, impulsadas por investigaciones orientadas al desarrollo y la implementación de biorrefinerías. Estas instalaciones multietapa y multiproducto están diseñadas para procesar materias primas específicas de origen biológico y producir productos como biopolímeros. En este contexto, diversos investigadores han estudiado los recientes avances en el uso de biomasa lignocelulósica para la producción de poli(hidroxialcanoatos) (PHA), un ejemplo destacado de esta línea de investigación [31].

Uno de los principales ámbitos industriales que genera grandes cantidades de subproductos es la industria de transformación de la madera como la celulosa y la hemicelulosa contenidas en los residuos que pueden convertirse en monómeros de azúcar C5 y C6 mediante hidrólisis en condiciones ácidas (hidrólisis ácida concentrada o diluida) o tratamiento químico y enzimático combinado. Los azúcares obtenidos pueden utilizarse como fuentes de carbono para la producción química y de biopolímeros mediante fermentación. Esta fermentación de los azúcares producidos puede llevarse a cabo simultáneamente con la hidrólisis enzimática o por separado. La principal ventaja de llevar a cabo la hidrólisis y la fermentación en operaciones unitarias separadas es que cada unidad se ejecuta en sus condiciones óptimas, mientras que los beneficios de un proceso simultáneo de hidrólisis y fermentación, aparte de la reducción de la inversión de capital, es el consumo directo de los azúcares producidos por el microorganismo fermentador y, por lo tanto, hay una inhibición insignificante de las enzimas productoras finales. Hasta ahora, la investigación se ha centrado principalmente en la producción de etanol por fermentación a partir de los compuestos del hidrolizado utilizando diversos microorganismos, como *Saccharomyces cerevisiae*, *Zymomonas mobilis* y *Escherichia coli* [32].

Otro sector industrial importante que genera grandes cantidades de residuos lignocelulósicos es la industria de la pasta y el papel. Los principales compuestos de los licores usados de las fábricas de pasta son la lignina o los lignosulfonatos, en el caso del proceso al sulfito, y los monómeros de azúcar resultantes de la descomposición de las hemicelulosas durante el proceso de digestión. Estos monómeros son principalmente azúcares C5 y C6, a saber, xilosa, arabinosa, manosa, galactosa y glucosa. También se produce acético a partir de la degradación de las hemicelulosas. La utilización del licor de sulfito usado o licor negro para la producción de productos químicos y biopolímeros no se ha estudiado en detalle. La investigación centrada en la fermentación de hidrolizados de madera para la producción química podría adaptarse en el caso de los licores usados [33].



Se ha propuesto que el carbono orgánico de las aguas residuales de la fábrica de papel se pueda fermentar para preparar un sustrato rico en AGV para el posterior enriquecimiento de la comunidad microbiana productora de PHA [34], donde las aguas residuales de las papeleras muestran las siguientes características (Tabla 2).

Tabla 2. Composición fisicoquímica de efluentes de la industria papelera: caracterización de sólidos, materia orgánica y nutrientes [34]

Parámetro	Valor
Sólidos Totales Suspendidos (STS) inicial	0,2 ± 0,02 g/L
Demanda Química de Oxígeno (DQO) inicial	26,3 ± 0,3 g/L
Glucosa	8 ± 1 mM
Ácidos grasos Volátiles (AGV)	79 ± 4 mM
NH4+	0,47 ± 0,02 mM

En este contexto, el uso de la cepa *Saccharophagus degradans* (ATCC 43961) ha mostrado avances significativos en la biorremediación de residuos lignocelulósicos generados por la industria tequilera, así como en su potencial aplicación para la producción de bioplásticos como productos de valor agregado [35]. La utilización de *S. degradans* resulta especialmente atractiva debido a su carácter no patógeno y a la presencia de complejos multienzimáticos altamente especializados que actúan en consorcio, permitiéndole despolimerizar y metabolizar una amplia variedad de polisacáridos complejos e insolubles (PCI). Además, estudios de identificación genómica han confirmado la presencia de tres enzimas clave involucradas en estos procesos.

Se ha demostrado que *S. degradans* posee la capacidad de hidrolizar celulosa cristalina, y se ha evaluado el efecto de la lignina sobre la cinética de crecimiento, determinándose que esta influye sustancialmente al prolongar el tiempo necesario para alcanzar la fase de crecimiento exponencial, aunque sin afectar la biomasa total producida. Asimismo, se ha observado que *S. degradans* es capaz de acumular polihidroxialcanoatos (PHA) en condiciones de agotamiento de nitrógeno, alcanzando concentraciones de hasta aproximadamente 1,5 mg/mL de biomasa total.

La búsqueda constante de nuevas cepas bacterianas capaces de almacenar polihidroxialcanoatos (PHA) utilizando fuentes de carbono más económicas y renovables ha llevado a explorar entornos novedosos y diversos, como es el intestino de las termitas [36]. En este contexto, se identificaron tres cepas bacterianas aisladas del intestino de la termita superior *Macrotermes carbonarius* que demostraron capacidad de acumulación de PHA mediante estudios microscópicos y experimentos de producción. Estas cepas mostraron un 99 % de homología con *Bacillus megaterium* y *Bacillus flexus*, caracterizadas por su rápido crecimiento y mayor capacidad de acumulación de PHA.

Los análisis realizados indicaron que estas cepas eran capaces de acumular PHA durante la fase de crecimiento utilizando diversas fuentes de carbono, incluidas glucosa, fructosa, acetato sódico, valerato sódico y 1,4-butanodiol. Además, el análisis del polímero mediante cromatografía de gases reveló que estaba compuesto principalmente por poli(3-hidroxibutirato) (PHB).



La hidrólisis de celulosa mediada por rutenio en un proceso de biorrefinería podría ser considerada como una alternativa en la producción de bioplásticos a partir de biomasa celulósica [37]. Para eso estudios previos se han realizado en la obtención de poli(3-hidroxiбутирато) [P(3HB)] a partir de glucosa utilizando como fuente celulosa de residuos generado utilizando *E. coli* recombinante con rutenio como catalizador.

El empleo de lodos activados procedentes de fábricas de papel se ha identificado como una alternativa prometedora para la producción de polihidroxialcanoatos (PHA) [38]. Esta estrategia se fundamenta en la selección de organismos acumuladores de glucógeno (GAOs, por sus siglas en inglés) mediante la alternancia controlada de condiciones anaerobias y aerobias. Como parte del proceso, durante la fermentación acidogénica se aplica un pretratamiento dirigido a transformar diversos compuestos orgánicos en ácidos grasos volátiles (AGV), que sirven como sustratos ideales para la posterior síntesis de PHA.

El enriquecimiento microbiano dio como resultado un cultivo dominado por *Deffluvicoccus vanus* (56 %) y *Candidatus Competibacter phosphatis* (22 %). La optimización de la acumulación de PHA por el cultivo enriquecido de GAOs se llevó a cabo mediante experimentos por lotes. En condiciones anaerobias, la acumulación de PHA estuvo limitada por la disponibilidad de glucógeno intracelular almacenado, mientras que en condiciones aerobias se observó una producción significativa de glucógeno, alcanzando hasta el 25 % del peso seco del lodo, junto con una acumulación de PHA de hasta el 22 % del peso seco.

Posteriormente, al aplicar un periodo anaeróbico tras un periodo aeróbico inicial, el glucógeno producido se utilizó para incrementar aún más la acumulación de PHA, logrando un contenido máximo de PHA del 42 % del peso seco del lodo. El rendimiento total del proceso fue de 0.10 kg de PHA por cada kilogramo de DQO del influente tratado. Este proceso se desarrolló utilizando un ciclo "feast/famine" (festín/hambruna), que permitió el enriquecimiento y selección eficiente de cepas bacterianas acumuladoras de PHA.

Residuos municipales y lodos de depuradora

Los lodos primarios y los lodos activados por residuos (Waste Activated Sludge, WAS) generados en las plantas de tratamiento de aguas residuales municipales se han estudiado con frecuencia para la producción de AGV debido a los enormes volúmenes generados en el tratamiento biológico de aguas residuales [39].

Ambos residuos presentan un alto contenido de materia orgánica, con una DQO total que oscila entre 14 800 mg/L y 23 000 mg/L, lo que los convierte en fuentes prometedoras para la producción de AGV. No obstante, la DQO soluble de los lodos suele ser entre diez y cien veces menor que su DQO total [40], lo que limita la disponibilidad inmediata de sustratos solubles. Esta condición retrasa la producción de AGV, dado que la hidrólisis de la materia orgánica particulada en los lodos constituye el paso limitante del proceso. Por ello, se requieren mayores esfuerzos para optimizar la etapa de hidrólisis, por ejemplo, mediante la aplicación de pretratamientos específicos.

El contenido y la tasa de producción de PHA alcanzados por los lodos activados se han comparado con los resultados obtenidos mediante fermentación con cultivos puros [41]. Por ejemplo, utilizando cepas de *Ralstonia eutropha*, *Alcaligenes latus* y *E.*



coli recombinante, se reportaron contenidos de PHA del 74 %, 50 % y 76 % del peso seco celular, respectivamente [42]. Estos valores son considerablemente superiores al contenido de PHA típico obtenido por los lodos activados, que generalmente no supera el 30 % del peso seco de los lodos.

No obstante, para que la producción de PHA sea económicamente viable, es fundamental alcanzar contenidos superiores al 80 % del peso seco celular. Esto subraya la importancia de optimizar la capacidad de acumulación de PHA en los lodos activados. Aun así, estos lodos han demostrado un notable potencial en términos de tasa de producción, alcanzando 28 mg C/g SS/h (miligramos de carbono producido por gramo de sólidos suspendidos por hora), valor comparable al de los cultivos puros. Este rendimiento evidencia la viabilidad de los lodos activados como sistema alternativo para la obtención de PHA a escala industrial.

Residuos alimentarios

Los principales sustratos de carbono de bajo costo de la industria alimentaria pueden utilizarse también para producir PHA. Por ejemplo, las aguas residuales de las almazaras, las melazas, el licor de remojo de maíz, las aguas residuales amiláceas, el salvado de arroz, el salvado de trigo y el efluente de los molinos de aceite de palma. Los residuos alimentarios tienen un alto contenido en humedad y materia orgánica, por lo que serían un sustrato ideal para la digestión anaerobia. Los residuos alimentarios o de cocina son el componente dominante (22-54 %) en los enormes volúmenes de residuos sólidos urbanos y tienen una elevada DQO total en un rango de 91 000- 166 180 mg/L [43]. Los ácidos grasos volátiles generados en los pasos de la digestión anaerobia (hidrólisis, acidogénesis y acetogénesis) son sustratos críticos para los microorganismos implicados en la producción de plásticos biodegradables y bioenergía; por lo que la acidogénesis de los residuos alimentarios también puede generar subproductos valiosos como H₂ o polihidroxialcanoatos. Esto ha hecho que, en los últimos años, la valorización de los residuos alimentarios cobre impulso y pueda desempeñar un papel fundamental en la era de la bioeconomía en lo que respecta a la producción de productos químicos y biopolímeros [44].

En un resumen del flujo de residuos aptos para la producción de PHA (Tabla 3) se observa que sólo tres corrientes de residuos contienen suficiente materia orgánica (DQO) para producir 3 500 toneladas de PHA/año. La concentración de estos flujos oscila entre 1,9 y 50 kg DQO m⁻³. La producción de PHA que utiliza el flujo más grande no es útil debido a la alta dilución del sustrato y a su disponibilidad durante sólo 3 meses al año, lo que conduce a un reactor grande e improductivo. Los residuos vegetales, frutales y de jardinería son residuos sólidos y deben acidificarse antes de su uso. Esto supone un paso adicional en el proceso de producción. Dado que sólo una pequeña parte de los residuos vegetales se solubilizará, seguirá existiendo un gran problema de eliminación. El percolado de la fracción orgánica húmeda de los residuos domésticos se considera el más adecuado para la producción de PHA. Tiene una concentración muy alta de ácidos grasos volátiles, está disponible en grandes cantidades y se puede transportar fácilmente. Existen varios informes sobre la producción de ácidos grasos volátiles a partir de efluentes de molinos de aceite de palma tratados anaeróbicamente y la utilización de estos ácidos orgánicos para producir PHA [4].

Tabla 3. Potencial de flujo y disponibilidad de residuos orgánicos como sustratos para la producción de polihidroxialcanoatos (PHA) [4]

Fuente de sustrato	Flujo (m ³ h ⁻¹)	Disponibilidad (mes/año)	*DQO (kg DQO/m ³)	Capacidad (ton DQO/m ³)	Producción (ton PHA/año)
Producción de fécula de patata	300	12	2,5	6 750	2 431
Azúcar de remolacha	3 750	3	1,9	15 604	5 773
Aguas residuales de cervecería	300	12	208	7 358	2 723
Hortalizas, frutas y verduras	90	12	15	11 774	4 356
Basura doméstica	30	12	50	13 333	4 933

*DQO: Demanda Química de Oxígeno, PHA: polihidroxialcanoatos

En tabla anterior se muestra los valores obtenidos de Capacidad que indica la capacidad total de carga de demanda química de oxígeno (DQO) que se puede manejar o convertir en un proceso en función del volumen total de flujo del sustrato (m³) y su concentración de DQO (kg DQO/m³).

La fórmula para calcular la capacidad en toneladas de DQO/m³ es:

$$\text{Capacidad (ton DQO)} = \text{Flujo (m}^3/\text{h)} \times \text{Disponibilidad (horas/año)} \times \text{DQO (kg/m}^3\text{)}$$

Entre las fuentes analizadas, el azúcar de remolacha mostró la mayor capacidad, alcanzando 15604 toneladas de DQO al año, debido a su alto flujo de 3750 m³/h, aunque con una disponibilidad limitada de tres meses al año. Por el contrario, los residuos de hortalizas, frutas y verduras, con una disponibilidad continua de 12 meses, registraron una capacidad de 11 774 toneladas de DQO anuales, gracias a su elevada concentración de 15 kg/m³ de DQO. Estos resultados evidencian que la combinación de flujo, disponibilidad y concentración de DQO es determinante para maximizar la capacidad de carga orgánica de los sustratos y, por ende, su potencial para ser utilizados en procesos de fermentación para la producción de PHA.

Melaza

La melaza es un subproducto viscoso obtenido de la transformación de la caña de azúcar o la remolacha azucarera en azúcar. Existen dos tipos de melazas: la melaza sulfurada y la melaza no sulfurada. La melaza sulfurada se forma durante la extracción del azúcar de la caña de azúcar verde inmadura cuando se añade dióxido de azufre como conservante durante el proceso de extracción del azúcar. La melaza no sulfurada procede de caña de azúcar madura que no requiere tratamiento con azufre [45]. La melaza de caña de azúcar se compone principalmente de sacarosa y fructosa y en la etapa previa de la producción de PHA, la fermentación acidogénica, el propionato y el valerato son los productos dominantes [46]. Es importante recordar que los productos de la fermentación acidogénica dependen de las propiedades de los bioplásticos obtenidos.



Se ha llevado a cabo una cantidad razonable de investigación sobre la utilización de melazas fermentadas para la producción de PHA. Se ha reportado que, a partir de un cultivo bacteriano mixto operado en un reactor de secuenciación discontinua (SBR) bajo un régimen de alimentación dinámica aeróbica (Aerobic Dynamic Feeding, ADF), es posible alcanzar una producción de P(3HB-co-3HV) equivalente hasta el 30 % del peso seco total de la biomasa, con una concentración máxima de 3,5 g/L. Microorganismos como *Thauera*, *Azoarcus* y *Paracoccus* se han identificado con frecuencia como productores clave de PHA [47].

Además, se ha investigado la producción de polihidroxialcanoatos (PHA) en condiciones aerobias utilizando cultivos microbianos mixtos acumuladores de glucógeno (OAG) y melaza de caña de azúcar fermentada como sustrato [48]. Los altos rendimientos de polímero y las elevadas tasas de producción obtenidas indican que el enriquecimiento de OAG podría ser una estrategia efectiva para la producción de PHA en cultivos mixtos empleando sustratos de desecho.

Residuos del proceso de fabricación de margarina.

En el proceso de la fabricación de margarina los residuos obtenidos también se constituyen en otra posibilidad de sustrato para obtener PHA. En este proceso, los aceites vegetales o las grasas animales se modifican mediante hidrogenación, reordenación y fraccionamiento, mezclándose con agua, salmuera e ingredientes en polvo. En la mezcla se incluyen aditivos (vitaminas, emulsionantes, sal, aromas) para mejorar la calidad del producto y potenciar su sabor. La mezcla es sometida a temperaturas de 50-60°C, lo que da lugar a la formación de una emulsión (margarina) que luego se pasteuriza y se envasa. Alrededor del 1 % de la producción de margarina da lugar a la generación de residuos que contienen grasa y que requieren una eliminación o tratamiento adecuados. Los residuos que contienen grasa suelen eliminarse de los efluentes acuosos producidos por la planta en un separador por gravedad [49]. Aunque su valor comercial es bajo, suele venderse a empresas de reciclaje de aceites. Los materiales que contienen grasa se han propuesto como materias primas para la producción de productos de valor añadido, concretamente polihidroxialcanoatos.

Los residuos de margarina no contienen nitrógeno y su composición principal se describe en la tabla 4:

Tabla 4. Perfil de composición de residuos generados en la producción de margarina [49]

Componente	Porcentaje en peso
Ácidos grasos libres	63,21 (\pm 2,01)
Glicerol	n.d.
Carbohidratos	10,70 (\pm 0,81)
Compuestos inorgánicos	< 0,5
Agua	6,80 (\pm 2,97)
Monoacilglicerol	0,22 (\pm 0,16)
Diacilglicerol	2,73 (\pm 0,44)
Triacilglicerol	16,13 (\pm 2,27)



Bagazo de frutas

En un estudio reciente, se emplearon residuos de 11 tipos de alimentos, los cuales fueron previamente homogeneizados mediante batido mecánico y posteriormente diluidos para su utilización (Tabla 5). Adicionalmente, subproductos de la industria alimentaria, como el bagazo de nueve tipos de frutas—incluyendo albaricoques, cerezas y uvas—, han demostrado un alto potencial como alternativas sostenibles a los azúcares y ácidos grasos de alto costo, comúnmente utilizados como fuentes de carbono en fermentaciones bacterianas [50].

Estos residuos representan una opción viable para la producción aséptica de polihidroxialcanoatos de cadena media (mcl-PHA) a través del empleo de cultivos puros de pseudomonas, lo que abre nuevas oportunidades para el desarrollo de procesos biotecnológicos más eficientes y económicamente viables.

Tabla 5. Composición proximal de residuos alimentarios domésticos [50]

Residuos de alimentos	Porcentaje en peso (% p/p)
Col	17
Cáscara de banano	13,5
Cáscara de naranjas	5
Esponjas vegetales	5
Peras	7
Manzanas	8,5
Apio	5
Fideos	8
Arroz cocido	9
Patatas	17
Zanahorias	5

En la mayoría de los países se genera una gran cantidad de residuos de frutas provenientes del prensado de uvas y la destilación de frutas como albaricoques y cerezas. Estos residuos, conocidos como orujos o bagazos, están compuestos por pieles, pulpa, tallos y semillas, y aunque generalmente son considerados desechos sin valor, su elevado contenido de polisacáridos (celulosa, hemicelulosa, almidón y pectina) a menudo pasa desapercibido. Dichos polisacáridos pueden ser aprovechados como sustratos de carbono para la fermentación y la generación de ácidos grasos volátiles (AGV).

Como ejemplo, los análisis realizados sobre el filtrado y centrifugado del bagazo de frutas, tras la adición de agua estéril (10 g de orujo + 40 g de agua estéril), se muestran en la Tabla 6 [51]. En estos resultados se identifican los componentes aptos para la generación de AGV y su posterior uso en la producción de PHA.

Tabla 6. Perfil de composición de bagazos: azúcares, ácidos orgánicos y taninos [51]

Componente	g/Kg
Azúcares (glucosa y fructosa)	106-164
Etanol	0-50
Tartrato	11,1-19,9
Malato	0,6-6,8
Succinato	0-0,6
Lactato	0-4,6
Acetato	0-0,3
Polvo de Tanino	0,8-7,9

Residuos de malta de la fabricación de la cerveza y residuos de soja

El uso de residuos agroindustriales como fuentes de carbono para la producción de bioplásticos ha sido ampliamente estudiado, destacándose los subproductos de la industria cervecera y la producción de soja. En particular, se ha investigado la aplicación de residuos semisólidos de soja (87 % de humedad) y malta molida seca como sustratos para procesos fermentativos. En un estudio, estos residuos fueron sometidos a un pretratamiento con HCl a 100 °C durante 8 horas, seguido de un proceso de centrifugación. Posteriormente, el sobrenadante fue neutralizado a pH 7 y diluido hasta un volumen final de 8 L para su utilización en la producción de biopolímeros [52].

Desde un punto de vista estequiométrico, la relación carbono/nitrógeno (C/N) de estos residuos se ha determinado en 7:1 y 8:1, respectivamente, lo que resalta su potencial como sustratos en la biosíntesis de bioplásticos, optimizando tanto el rendimiento del proceso como la composición final del polímero obtenido.

Un aspecto destacado del estudio es que, al utilizar cepas recombinantes de *A. latus* DSM 1124, se logró un rendimiento de producción de polímeros de hasta el 70 % (g de polímero/g de célula) y un peso seco celular de 32 g/L utilizando exclusivamente residuos de malta. Además, los resultados demostraron que, dependiendo del tipo de residuo alimentario empleado, es posible obtener distintos copolímeros de polihidroxialcanoato (PHA) con propiedades diferenciadas.

Residuos de café usados (borra)

La borra es el residuo de la fracción sólida derivada de las industrias del café, cuya eliminación representa un grave problema medioambiental. El hidrolizado de borra pudo ser convertido en polihidroxialcanoatos mediante acción de *Burkholderia cepacia*. La bacteria es capaz de utilizar el hidrolizado y producir copolímero de 3-hidroxibutirato y 3-hidroxivalerato. El ácido levulínico, probablemente sirve como precursor del 3HV para la biosíntesis del copolímero [53].

Suero de queso

El suero es un subproducto generado durante la producción de queso o caseína, y reviste gran importancia en la industria láctea no solo por su composición nutricional, sino



también por los elevados volúmenes producidos. Se estima que la producción mundial de suero alcanza entre 180 y 190 millones de toneladas por año, de las cuales solo alrededor del 50 % se somete a procesamiento. Aproximadamente la mitad del suero producido a nivel mundial se destina a la elaboración de diversos productos alimenticios y piensos: cerca del 50 % se emplea directamente en forma líquida, el 30 % se transforma en suero en polvo, el 15 % se procesa como lactosa —también considerada un subproducto— y el resto se utiliza para obtener concentrados de proteínas de suero [54].

En la Unión Europea se produce un total de 40 millones de toneladas/año de lactosuero; el excedente anual de lactosuero es de 13 millones de toneladas, que contienen unas 619 250 toneladas de lactosa. En la actualidad, este excedente no se utiliza para la producción de lactosa, por lo que su eliminación representa un grave problema desde el punto de vista económico. Su uso como medio de fermentación puede ser ventajoso no sólo para el medio ambiente, sino también para una economía sostenible [55].

En los últimos años, el suero de queso ha sido empleado en diversas bioconversiones, destacándose como un sustrato versátil para aplicaciones industriales y biotecnológicas. Entre sus usos, se incluyen la producción de biomasa microbiana como suplemento alimenticio para animales, la generación de biogás a través de bacterias metanogénicas anaerobias, y la producción de bioetanol mediante *Kluyveromyces marxianus* o cepas recombinantes de *Saccharomyces cerevisiae*. Además, el suero de queso hidrolizado, rico en lactosa, se ha utilizado para la síntesis de edulcorantes y suplementos dietéticos [56].

En la actualidad puede ser interesante considerar la posibilidad de utilizar el suero de queso debido a las nuevas demandas como síntesis de bioplásticos (polihidroxialcanoato PHA) y otros usos.

El lactosuero representa entre el 80 y el 90 % del volumen de leche procesada, donde sólo la mitad de este suero se convierte en productos útiles para el consumo animal y humano, mientras que el resto se elimina como residuo causando graves problemas medioambientales debido a su elevada demanda química de oxígeno (DQO entre 50 y 70 g L⁻¹) derivada de su alto contenido en lactosa (70-75 %) y proteínas solubles (10-15 %). Suele mezclarse con el agua de lavado del vertido del lactosuero en pequeñas industrias dando lugar a un efluente que contiene alrededor de 2 a 4 g DQO L⁻¹ requiriendo un tratamiento previo al vertido generalmente costoso que obliga a buscar una alternativa más barata en pequeñas industrias.

Varias bacterias, como *Paracoccus hydrogenovora*, *Hydrogenophaga pseudoflava* y *Haloferax mediterranei* presentan limitaciones en la producción de PHA a partir de lactosuero; sin embargo, se han reportado mejoras significativas mediante la coalimentación con pentanoato y la utilización de cultivos mixtos [57]. Estudios previos han demostrado la viabilidad del lactosuero como sustrato para la obtención de PHA y ácidos grasos volátiles (AGV) bajo condiciones controladas, lo que evidencia su potencial como materia prima para procesos de valorización biotecnológica [58].

La aplicación de un enfoque de tres etapas para la producción de polihidroxialcanoatos (PHA) ha demostrado ser una estrategia efectiva, en la cual se emplean cultivos microbianos mixtos en combinación con sustratos de bajo costo, como el suero de



queso y la melaza de caña de azúcar. Estos subproductos agroindustriales han sido utilizados como fuentes de carbono en el desarrollo de modelos y estrategias de producción optimizadas para este biopolímero [59].

Durante la fase acidogénica, la composición del sustrato influye significativamente en el perfil de los productos fermentativos, determinando la proporción de los ácidos grasos volátiles (AGV) generados. Se ha observado que el suero de queso favorece la producción de acetato y butirato, mientras que la melaza de caña de azúcar promueve la formación de propionato y valerato como metabolitos predominantes.

En las etapas posteriores del proceso, las condiciones de cultivo y la selección de microorganismos enriquecidos en PHA están directamente influenciadas por estas diferencias en la composición de los AGV. La concentración final del polímero obtenido depende de la proporción de monómeros de 3-hidroxibutirato (HB) y 3-hidroxivalerato (HV) generados en la fase acidogénica, lo que resalta la importancia del control de la fermentación inicial para la optimización del rendimiento y la composición del biopolímero.

Los resultados muestran que los cultivos seleccionados alcanzan un máximo de producción de PHA del 56 % al utilizar melaza de caña y del 65 % cuando se emplea suero de queso.

Residuos del aceite de palma

La industria del aceite de palma genera una gran cantidad de residuos provenientes de los molinos de procesamiento, incluyendo cáscaras, fibras y efluentes. Estos materiales residuales, abundantes y renovables, tienen el potencial de ser utilizados como biomasa para la producción de combustibles alternativos, electricidad o bioplásticos.

Los residuos lignocelulósicos derivados de estos procesos contienen altas proporciones de celulosa (50 %), hemicelulosa (25 %) y lignina (25 %). Los componentes holocelulósicos (celulosa y hemicelulosa) pueden transformarse en azúcares fermentables, que constituyen recursos renovables clave para aplicaciones industriales [60]. Específicamente, la hemicelulosa y la celulosa pueden hidrolizarse en xilosa y glucosa mediante tratamientos ácidos y procesos de sacarificación enzimática. Por otro lado, la lignina puede eliminarse eficientemente mediante pretratamientos químicos o térmicos.

La sacarificación enzimática ofrece un control más preciso sobre la degradación de la celulosa en glucosa, mientras que los tratamientos ácidos pueden generar subproductos adicionales. Para optimizar estos procesos, es posible aplicar pretratamientos físicos y químicos que incrementen la producción de enzimas celulíticas por parte de hongos y bacterias. Estos pretratamientos promueven una mayor conversión de celulosa en azúcares fermentables.

Estudios recientes sobre la bioconversión de residuos de palma en azúcares han demostrado que esta biomasa es una materia prima adecuada para procesos de fermentación industrial, destacándose como una opción viable para la producción de PHA.

Además de la biomasa sólida, la industria del aceite de palma genera grandes volúmenes de efluentes líquidos, denominados efluentes de molino de aceite de palma (Palm Oil



Mill Effluent, POME). Estos efluentes se caracterizan por una elevada demanda química de oxígeno (DQO), con valores que pueden alcanzar hasta 8 000 mg/L. Durante etapas del proceso como la esterilización de racimos de fruta fresca, la clarificación del aceite y las operaciones de hidrociclón, el POME puede producir ácidos grasos volátiles (AGV) con concentraciones de hasta 15 300 mg/L [61].

Debido a su alto contenido orgánico, el POME debe ser pretratado antes de su disposición final en el medio ambiente. Para reducir la DQO desde aproximadamente 50 kg/m³ hasta 0,1 kg/m³, la digestión anaerobia se utiliza comúnmente como tratamiento primario [62]. Durante la primera etapa de este proceso, bacterias acidogénicas descomponen el aceite residual y los materiales lignocelulósicos presentes en el POME, generando ácidos orgánicos.

Estudios recientes han demostrado que los ácidos orgánicos obtenidos a partir de POME clarificado pueden emplearse como sustratos para la producción de PHA, y su calidad es comparable a la de los ácidos orgánicos de origen comercial. Por ejemplo, cepas bacterianas como *Rhodobacter sphaeroides*, *Cupriavidus necator* ATCC 17699 y *Comamonas sp.* EB172 han logrado transformar eficazmente estos ácidos orgánicos en polímeros PHA [63].

Asimismo, se ha informado sobre la producción de PHA utilizando cultivos microbianos mixtos en un proceso de fermentación en dos etapas: la fermentación anaeróbica acidogénica y la acumulación aeróbica de PHA [64]. Al alimentar a estos cultivos con AGV derivados del POME fermentado anaeróbicamente, se alcanzó una alta acumulación de PHA, con un contenido máximo del 40 % del peso celular seco, acompañado de una eliminación superior al 80 % de la DQO.

La acumulación de PHA utilizando cultivos microbianos mixtos presenta varios retos, como la selección de consorcios microbianos adecuados con capacidad para una elevada acumulación de PHA y el desarrollo de operaciones de bajo coste de unidades de procesamiento aguas abajo. El procesamiento posterior es el paso para la extracción y purificación del PHA acumulado intracelularmente. El método de recuperación de PHA depende de los cultivos microbianos mixtos con acumulación de PHA. Así, el cultivo mixto en POME ha permitido una producción significativa de PHA, pero puede aumentar la complejidad de la recuperación del PHA de las células. Por otro lado, es necesario controlar los tipos de biopolímeros producidos por la población microbiana. Además, la estrategia de fermentación debe centrarse en optimizar el contenido de PHA y la productividad volumétrica [63]. La estrategia propuesta no sólo debería reducir los costos globales de producción de PHA, sino también ayudar a resolver los problemas de gestión de residuos en la industria del aceite de palma.

CONCLUSIONES

La valorización de biomasa, especialmente de aquellas fuentes ricas en carbono, representa una oportunidad inigualable para transitar hacia una economía más sostenible y circular. Esta revisión sistemática ha evidenciado un creciente interés en el desarrollo de tecnologías innovadoras para transformar la biomasa en productos de alto valor agregado. Sin embargo, persisten desafíos relacionados con la heterogeneidad de las fuentes, la optimización de procesos y la escalabilidad. Las perspectivas futuras apuntan



hacia un panorama prometedor, con el surgimiento de nuevas tecnologías, la integración de biorrefinerías y el desarrollo de biomateriales avanzados. La bioeconomía circular, combinada con otras tecnologías emergentes, permitirá una utilización más eficiente de la biomasa y una reducción significativa de las emisiones de gases de efecto invernadero. En conclusión, la valorización de biomasa es un campo en constante evolución que requiere de una mayor inversión en investigación y desarrollo para aprovechar todo su potencial y contribuir a un futuro más sostenible. En lo que se refiere a los ácidos grasos volátiles, todavía se requiere más investigación y desarrollo para explorar nuevas tecnologías para producir polihidroxialcanoatos con calidad consistente a partir del tratamiento de aguas residuales utilizando AGV para asegurar sostenibilidad en los procesos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Estatal Península de Santa Elena por permitirnos realizar este trabajo de investigación.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

Diseño y conceptualización: Rolando Calero y Gerardo Herrera.

Redacción del artículo: Rolando Calero.

Todos los autores han leído y aprobado el manuscrito final y consienten en su publicación.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores manifiestan que no hay conflicto de interés en esta investigación y que no ha habido financiación externa para esta investigación. No existe ningún interés financiero que declarar.

REFERENCIAS

- [1] Güleç, F., & Okolie, J. A. (2024). Decarbonising bioenergy through biomass utilisation in chemical looping combustion and gasification: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 22(1), 121–147. <https://doi.org/10.1007/s10311-023-01656-5>
- [2] Wijerathna, P. A. K. C., Udayagee, K. P. P., Idroos, F. S., & Manage, P. M. (2023). Waste biomass valorization and its application in the environment. In D. B. Pal & A. K. Tiwari (Eds.), *Sustainable valorization of agriculture & food waste biomass: Application in bioenergy & useful chemicals* (pp. 1–28). Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-99-0526-3_1
- [3] Fernández, F. J., Castro, M. C., Villaseñor, J., & Rodríguez, L. (2011). Agro-food wastewaters as external carbon source to enhance biological phosphorus removal. *Chemical Engineering Journal*, 166(2), 559–567. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2010.11.023>
- [4] Lee, W. S., Chua, A. S. M., Yeoh, H. K., & Ngoh, G. C. (2014). A review of the production and applications of waste-derived volatile fatty acids. *Chemical Engineering Journal*, 235, 83–99. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.09.002>
- [5] Atasoy, M., Owusu-Agyeman, I., Plaza, E., & Cetecioglu, Z. (2018). Bio-based volatile fatty acid production and recovery from waste streams: Current status and future challenges. *Bioresour. Technol.*, 268, 773–786. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.07.042>
- [6] Puyol, D., Batstone, D. J., Hülsen, T., Astals, S., Peces, M., & Krömer, J. O. (2017). Resource recovery from wastewater by biological technologies: opportunities, challenges, and prospects. *Frontiers in microbiology*, 7. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.02106>
- [7] Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2020). *The state of food and agriculture 2020: Overcoming water challenges in agriculture*. FAO. <https://doi.org/10.4060/cb1447en>
- [8] Sarkar, B., Chakrabarti, P. P., Vijaykumar, A., & Kale, V. (2006). Wastewater treatment in dairy industries—possibility of reuse. *Desalination*, 195(1–3), 141–152. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2005.11.015>
- [9] Sahu, O. (2018). Assessment of sugarcane industry: Suitability for production, consumption, and utilization. *Annals of Agrarian Science*, 16(4), 389–395. <https://doi.org/10.1016/j.aasci.2018.08.001>
- [10] Bustillo-Lecompte, C. F., & Mehrvar, M. (2015). Slaughterhouse wastewater characteristics, treatment, and management in the meat processing industry: A review on trends and advances. *Journal of environmental management*, 161. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.07.008>
- [11] WWAP (United Nations World Water Assessment Programme). (2022). *The United Nations World Water Development Report 2022: Groundwater: Making the Invisible Visible*. UNESCO. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000380721>
- [12] Dutta, A., & Sarkar, S. (2015). Sequencing batch reactor for wastewater treatment: recent advances. *Current Pollution Reports*, 1, 177–190. <https://link.springer.com/article/10.1007/S40726-015-0016-Y>
- [13] Battista, F., Strazzer, G., Valentino, F., Gottardo, M., Villano, M., Matos, M., Silva, F., Reis, M. A. M., Mata-Álvarez, J., Astals, J., Dosta, J., Jones, R. J., Massanet-Nicolau, J., Guwy, A., Pavan, P., Bolzonella, D., & Majone, M. (2022). *New insights in food waste, sewage sludge and green waste anaerobic fermentation for shortchain volatile fatty acids production: A review*. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(5), 108319. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108319>
- [14] Ramos-Suarez, M., Zhang, Y., & Outram, V. (2021). Current perspectives on acidogenic fermentation to produce volatile fatty acids from waste. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 20(2), 439–478. <https://link.springer.com/article/10.1007/S11157-021-09566-0>
- [15] Albuquerque, M. G. E., Eiroa, M., Torres, C., Nunes, B. R., & Reis, M. A. M. (2007). Strategies for the development of a side stream process for polyhydroxyalkanoate (PHA) production from sugar cane molasses. *Journal of biotechnology*, 130(4), 411–421. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2007.05.011>
- [16] Albuquerque, M. G. E., Torres, C. A. V., & Reis, M. A. M. (2010). Polyhydroxyalkanoate (PHA) production by a mixed microbial culture using sugar molasses: effect of the influent substrate concentration on culture selection. *Water research*, 44(11), 3419–3433. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.03.021>



- [17] Rodrigues, A. M., Franca, R. D. G., Dionísio, M., Sevrin, C., Grandfils, C., Reis, M. A., & Lourenço, N. D. (2022). Polyhydroxyalkanoates from a mixed microbial culture: extraction optimization and polymer characterization. *Polymers*, *14*(11), 2155. <https://doi.org/10.3390/polym14112155>
- [18] Eraslan, K., Aversa, C., Nofar, M., Barletta, M., Gisario, A., Salehiyan, R., & Goksu, Y. A. (2022). Poly (3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyhexanoate)(PHBH): Synthesis, properties, and applications-A review. *European Polymer Journal*, *167*, 111044. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2022.111044>
- [19] Saratale, R. G., Cho, S.-K., Saratale, G. D., Kumar, M., Bharagava, R. N., Varjani, S., Kadam, A. A., Ghodake, G. S., Palem, R. R., Mulla, S. I., Kim, D.-S., & Shin, H.-S. (2021). An overview of recent advancements in microbial polyhydroxyalkanoates (PHA) production from dark fermentation acidogenic effluents: A path to an integrated bio-refinery. *Polymers*, *13*(24), 4297. <https://doi.org/10.3390/polym13244297>
- [20] Aljaafari, A., Fattah, I. M. R., Jahiril, M. I., Gu, Y., Mahlia, T. M. I., Islam, M. A., & Islam, M. S. (2022). Biodiesel emissions: a state-of-the-art review on health and environmental impacts. *Energies*, *15*(18), 6854. <https://doi.org/10.3390/en15186854>
- [21] Kośmider, A., Leja, K., & Czaczyk, K. (2011). Improved utilization of crude glycerol by-product from biodiesel production. *Biodiesel—quality, emissions and by-products*, *19*, 341-365.
- [22] Changmai, B., Vanlalveni, C., Ingle, A. P., Bhagat, R., & Rokhum, S. L. (2020). Widely used catalysts in biodiesel production: a review. *RSC advances*, *10*(68). <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2020/ra/d0ra07931f>
- [23] Mothes, G., Schnorpfel, C., & Ackermann, J. U. (2007). Production of PHB from crude glycerol. *Engineering in Life Sciences*, *7*(5), 475–479. <https://doi.org/10.1002/elsc.200620210>
- [24] Leiva-Candia, D. E., Tsakona, S., Kopsahelis, N., Garcia, I. L., Papanikolaou, S., Dorado, M. P., & Koutinas, A. A. (2015). Biorefining of by-product streams from sunflower-based biodiesel production plants for integrated synthesis of microbial oil and value-added co-products. *Bioresource Technology*, *190*, 57-65. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.03.114>
- [25] Cavalheiro, J. M. B. T., Raposo, R. S., de Almeida, M. C. M. D., Cesário, M. T., Sevrin, C., Grandfils, C., & da Fonseca, M. M. R. (2012). Effect of cultivation parameters on the production of poly(3-hydroxybutyrate-co-4-hydroxybutyrate) and poly(3-hydroxybutyrate-4-hydroxybutyrate-3-hydroxyvalerate) by *Cupriavidus necator* using waste glycerol. *Bioresource Technology*, *111*, 391–397. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.01.176>
- [26] Reddy, V. U. N., Ramanaih, S. V., Venkateswar Reddy, M., & Chang, Y.-C. (2022). Review of the developments of bacterial medium-chain-length polyhydroxyalkanoates (mcl-PHAs). *Bioengineering*, *9*(5), 225. <https://doi.org/10.3390/bioengineering9050225>
- [27] Zhu, C., Nomura, C. T., Perrotta, J. A., Stipanovic, A. J., & Nakas, J. P. (2009). Production and characterization of poly-3-hydroxybutyrate from biodiesel-glycerol by *Burkholderia cepacia* ATCC 17759. *Biotechnology Progress*, *25*(6), 1230–1236. <https://doi.org/10.1002/btpr.355>
- [28] Ibrahim, M. H. A., & Steinbüchel, A. (2010). *Zobellella denitrificans* strain MW1, a newly isolated bacterium suitable for poly(3-hydroxybutyrate) production from glycerol. *Journal of Applied Microbiology*, *108*(1), 214–225. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2009.04413.x>
- [29] Moralejo-Gárate, H., Mar'atusalihah, E., Kleerebezem, R., & Loosdrecht, M. C. M. van. (2011). Microbial community engineering for biopolymer production from glycerol. *Applied Microbiology and Biotechnology*, *92*(3), 631–639. <https://doi.org/10.1007/s00253-011-3359-3>
- [30] Moita, R., Freches, A., & Lemos, P. C. (2014). Crude glycerol as feedstock for polyhydroxyalkanoates production by mixed microbial cultures. *Water Research*, *58*, 9–20. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.03.066>
- [31] Dietrich, K., Dumont, M.-J., Del Río, L. F., & Orsat, V. (2019). Sustainable PHA production in integrated lignocellulose biorefineries. *New Biotechnology*, *49*, 161–168. <https://doi.org/10.1016/j.nbt.2018.11.004>
- [32] Lau, M. W., Gunawan, C., Balan, V., & Dale, B. E. (2010). Comparing the fermentation performance of *Escherichia coli* K011, *Saccharomyces cerevisiae* 424A(LNH-ST) and *Zymomonas mobilis* AX101 for cellulosic ethanol production. *Biotechnology for Biofuels*, *3*, 11. <https://doi.org/10.1186/1754-6834-3-11>
- [33] Koutinas, A. A., Vlysidis, A., Pleissner, D., Kopsahelis, N., Lopez Garcia, I., Kookos, I. K., Papanikolaou, S., Kwan, T. H., & Lin, C. S. K. (2014). Valorization of industrial waste and by-product streams via fermentation for the production of chemicals and biopolymers. *Chemical Society Reviews*, *43*(8), 2587–2627. <https://doi.org/10.1039/C3CS60293A>



- [34] Jiang, Y., Marang, L., Tamis, J., van Loosdrecht, M. C. M., Dijkman, H., & Kleerebezem, R. (2012). Waste to resource: Converting paper mill wastewater to bioplastic. *Water Research*, 46(17), 112. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.07.028>
- [35] Alva Munoz, L. E., & Riley, M. R. (2008). Utilization of cellulosic waste from tequila bagasse and production of polyhydroxyalkanoate (PHA) bioplastics by *Saccharophagus degradans*. *Biotechnology and Bioengineering*, 99(4), 882–894. <https://doi.org/10.1002/bit.21854>
- [36] Tay, B. Y., Lokesh, B. E., Lee, C. Y., & Sudesh, K. (2010). Polyhydroxyalkanoate (PHA) accumulating bacteria from the gut of higher termite *Macrotermes carbonarius* (Blattodea: Termitidae). *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 26. <https://doi.org/10.1007/s11274-009-0264-3>
- [37] Nduko, J. M., Suzuki, W., Matsumoto, K., Kobayashi, H., Ooi, T., Fukuoka, A., & Taguchi, S. (2012). Polyhydroxyalkanoates production from cellulose hydrolysate in *Escherichia coli* L55218 with superior resistance to 5-hydroxymethylfurfural. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 113(1), 51–53. <https://doi.org/10.1016/j.jbiosc.2011.08.021>
- [38] Tamis, J., Mulders, M., Dijkman, H., Rozendal, R., van Loosdrecht, M. C. M., & Kleerebezem, R. (2018). Pilot-scale polyhydroxyalkanoate production from paper mill wastewater: Process characteristics and identification of bottlenecks for full-scale implementation. *Journal of Environmental Engineering*, 144(10), 0401810. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0001444](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001444)
- [39] Jiang, S., Chen, Y., Zhou, Q., & Gu, G. (2007). Biological short-chain fatty acids (SCFAs) production from waste-activated sludge affected by surfactant. *Water Research*, 41(14), 3112–3120. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2007.03.039>
- [40] Ji, Z., Chen, G., & Chen, Y. (2010). Effects of waste activated sludge and surfactant addition on primary sludge hydrolysis and short-chain fatty acids accumulation. *Bioresour. Technology*, 101(10), 3457–3464. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.12.117>
- [41] Koller, M. (2018). A review on established and emerging fermentation schemes for microbial production of polyhydroxyalkanoate (PHA) biopolyesters. *Fermentation*, 4(2), 30. <https://doi.org/10.3390/fermentation4020030>
- [42] Thirumala, M., & Reddy, S. V. (2012). Production of PHA by recombinant organisms. *International Journal of Life Sciences Biotechnology and Pharma Research*, 1(2), 40–62. <https://www.ijlbrp.com/uploadfiles/20150413044915354.20230301094258.pdf?utm>
- [43] De La Rubia, M. A., Raposo, F., Rincón, B., & Borja, R. (2009). Evaluation of the hydrolytic–acidogenic step of a two-stage mesophilic anaerobic digestion process of sunflower oil cake. *Bioresour. Technology*, 100(18), 4133–4138. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.04.001>
- [44] Chen, Y.-J., Tsai, P.-C., Hsu, C.-H., & Lee, C.-Y. (2014). Critical residues of class II PHA synthase for expanding the substrate specificity and enhancing the biosynthesis of polyhydroxyalkanoate. *Enzyme and Microbial Technology*, 61–62. <https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2014.01.005>
- [45] Akaraonye, E., Keshavarz, T., & Roy, I. (2010). Production of polyhydroxyalkanoates: The future green materials of choice. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 85(6), 732–743. <https://doi.org/10.1002/jctb.2392>
- [46] Duque, A. F., Oliveira, C. S. S., Carmo, I. T. D., Gouveia, A. R., Pardelha, F., Ramos, A. M., & Reis, M. A. M. (2014). Response of a three-stage process for PHA production by mixed microbial cultures to feedstock shift: Impact on polymer composition. *New Biotechnology*, 31(4), 276–288. <https://doi.org/10.1016/j.nbt.2013.10.010>
- [47] Albuquerque, M. G. E., Carvalho, G., Kragelund, C., Silva, A. F., Barreto Crespo, M. T., Reis, M. A. M., & Nielsen, P. H. (2013). Link between microbial composition and carbon substrate-uptake preferences in a PHA-storing community. *The ISME Journal*, 7(1), 1–12. <https://doi.org/10.1038/ismej.2012.74>
- [48] Bengtsson, S., Pisco, A. R., Reis, M. A. M., & Lemos, P. C. (2010). Production of polyhydroxyalkanoates from fermented sugar cane molasses by a mixed culture enriched in glycogen accumulating organisms. *Journal of Biotechnology*, 145(3), 253–263. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2009.11.016>
- [49] Morais, C., Freitas, F., Cruz, M. V., Paiva, A., Dionísio, M., & Reis, M. A. M. (2014). Conversion of fat-containing waste from the margarine manufacturing process into bacterial polyhydroxyalkanoates. *International Journal of Biological Macromolecules*, 71, 68–73. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2014.04.044>

- [50] Bisht, T. S., Sharma, S. K., Rawat, L., Chakraborty, B., & Yadav, V. (2020). A novel approach towards the fruit specific waste minimization and utilization: A review. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 9(1), 712–722. www.phytojournal.com/archives/2020.v9.i1.10532/a-novel-approach-towards-the-fruit-specific-waste-minimization-and-utilization-a-review
- [51] Follonier, S., Goyder, M. S., Silvestri, A.-C., Crelier, S., Kalman, F., Riesen, R., & Zinn, M. (2014). Fruit pomace and waste frying oil as sustainable resources for the bioproduction of medium-chain-length polyhydroxyalkanoates. *International Journal of Biological Macromolecules*, 71, 42–52. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2014.05.061>
- [52] Wong, A. L., Chua, H., Lo, W. H., & Yu, P. H. F. (2000). Synthesis of bioplastics from food industry wastes with activated sludge biomass. *Water Science and Technology*, 41(12), 55–59. <https://doi.org/10.2166/wst.2000.0239>
- [53] Obruca, S., Benesova, P., Petrik, S., Oborna, J., Prikryl, R., & Marova, I. (2014). Production of polyhydroxyalkanoates using hydrolysate of spent coffee grounds. *Process Biochemistry*, 49(9), 1409–1414. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2014.05.013>
- [54] Mollea, C., Marmo, L., & Bosco, F. (2013). Valorisation of cheese whey, a by-product from the dairy industry. In I. Muzzalupo (Ed.), *Food industry. IntechOpen*. <https://doi.org/10.5772/53159>
- [55] Klai, N., Yadav, B., El Hachimi, O., Pandey, A., Sellamuthu, B., & Tyagi, R. D. (2021). Agro-industrial waste valorization for biopolymer production and life-cycle assessment toward circular bioeconomy. In A. Pandey, R. D. Tyagi, & S. Varjani (Eds.), *Biomass, biofuels, biochemicals* (pp. 515–555). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821878-5.00007-6>
- [56] Aldana, A. S. (2022). *Aplicaciones y tecnologías utilizadas para el aprovechamiento del suero lácteo, la producción del suero en solvo, derivados y sus aplicaciones en la industria en general de alimentos* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD)]. Repositorio Institucional UNAD. <https://core.ac.uk/reader/533907960>
- [57] Mitra, R., Xu, T., Xiang, H., & Han, J. (2020). Current developments on polyhydroxyalkanoates synthesis by using halophiles as a promising cell factory. *Microbial Cell Factories*, 19. <https://doi.org/10.1186/s12934-020-01342-z>
- [58] Horvat, P., Muhr, A., Salerno, A., Braunegg, G., Koller, M., Casella, S., Reiterer, A., & Chiellini, E. (2012). Whey lactose as a raw material for microbial production of biodegradable polyesters. In E. Chiellini (Ed.), *Polyester* (pp. 51–92). InTech. <https://library.oapen.org/handle/20.500.12657/49047>
- [59] Carvalho, G., Pedras, I., Karst, S. M., Oliveira, C. S., Duque, A. F., Nielsen, P. H., & Reis, M. A. (2018). Functional redundancy ensures performance robustness in 3-stage PHA-producing mixed cultures under variable feed operation. *New biotechnology*, 40. <https://doi.org/10.1016/j.nbt.2017.08.007>
- [60] Saadon, S. Z. A. H., Osman, N. B., & Yusup, S. (2022). Pretreatment of fiber-based biomass material for lignin extraction. In S. Yusup & N. A. Rashidi (Eds.), *Value-chain of biofuels* (pp. 105–135). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824388-6.00024-5>
- [61] Ahmed, Y., Yaakob, Z., Akhtar, P., & Sopian, K. (2015). Production of biogas and performance evaluation of existing treatment processes in palm oil mill effluent (POME). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 1260–1278. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.073>
- [62] Amaral, A. R., Bernar, L. P., Ferreira, C. C., Pereira, A. M., Dos Santos, W. G., Pereira, L. M., Santos, M. C., Assunção, F. P. d. C., Mendonça, N. M., Pereira, J. A. R., da Mota, S. A. P., Mâncio, A. d. A., Junior, S. D., Borges, L. E. P., Machado, N. T., & de Castro, D. A. R. (2023). Economic Analysis of Thermal–Catalytic Process of Palm Oil (*Elaeis guineensis*, Jacq) and Soap Phase Residue from Neutralization Process of Palm Oil (*Elaeis guineensis*, Jacq). *Energies*, 16(1), 492. <https://doi.org/10.3390/en16010492>
- [63] Hassan, M. A., Yee, L. N., Yee, P. L., Ariffin, H., Raha, A. R., Shirai, Y., & Sudesh, K. (2013). Sustainable production of polyhydroxyalkanoates from renewable oil-palm biomass. *Biomass and Bioenergy*, 50, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.10.014>
- [64] Salmiati, U., Ujang, Z., Salim, M. R., Md Din, M. F., & Ahmad, M. A. (2007). Intracellular biopolymer productions using mixed microbial cultures from fermented POME. *Water Science and Technology*, 56(8), 179–185. <https://doi.org/10.2166/wst.2007.687>

Towards a Definition of Computing Continuum

Pablo Josue Rojas Yepes^{1*}, Carlos Jaime Barrios Hernández¹, Oscar Carrillo², Frédéric Le Mouë¹

¹Supercomputación y Cálculo Científico (SC3UIS), Grupo de Investigación en Cómputo Avanzado y de Gran Escala (CAGE), Universidad Industrial de Santander (UIS), Bucaramanga, Colombia

²Univ Lyon, CPE, INSA Lyon, Inria, CITI, EA3720, F-69621 Villeurbanne, France

*Corresponding author, email: sthongurdt@hotmail.com

Hacia una definición del Computing Continuum

Abstract

The evolution of the Computing Continuum, coupled with DevOps practices, marks a significant transformation in modern computing. This paper examines the integration of cloud, fog, edge, and Internet of Things (IoT) technologies to enhance resource utilization, scalability, and collaboration. The synergy between DevOps and orchestration systems automates essential processes, optimizing both performance and security. Despite challenges such as coordination complexities and talent shortages, these advancements hold the potential for increased flexibility and efficiency in Computing Continuum environments. The paper concludes by proposing a definition of the Computing Continuum, informed by state-of-the-art concepts and the interplay between multi-architecture orchestration and DevOps culture.

Keywords: Cloud-to-Edge continuum, Cloud-to-Things continuum, Fog computing, Edge computing, IoT application, DevOps culture, Orchestration and Resource Management.

Resumen

La evolución del Computing Continuum, junto con las prácticas de DevOps, marca una transformación significativa en la computación moderna. Este documento examina la integración de las tecnologías Cloud, Fog, Edge e Internet of Things (IoT) para mejorar la utilización de recursos, la escalabilidad y la colaboración. La sinergia entre DevOps y los sistemas de orquestación automatiza procesos esenciales, optimizando tanto el rendimiento como la seguridad. A pesar de los desafíos como las complejidades de coordinación y la escasez de talento, estos avances tienen el potencial de aumentar la flexibilidad y la eficiencia en los entornos del Computing Continuum. El documento concluye proponiendo una definición del Computing Continuum, basada en conceptos de vanguardia y la interacción entre la orquestación multiarquitectura y la cultura DevOps.

Palabras clave: Continuidad de la Nube al Borde, Continuidad de la Nube al IoT, Computación en la Niebla, Computación en el Borde, Aplicaciones IoT, Cultura DevOps, Orquestación y Administración de Recursos.

INTRODUCTION

Since the early 21st century, computational capabilities have addressed significant human needs, leading to the development of methods and tools to ensure continuity across



Licencia Creative Commons
Atribución-NoComercial 4.0



Editado por /
Edited by:
Dennis Cazar

Recibido /
Received:
19/11/2024

Aceptado /
Accepted:
24/12/2024

Publicado en línea /
Published online:
25/07/2025



various domains such as data, infrastructure, operations, and development. A Computing Continuum system is designed to manage continuous data streams and enable real-time processing for ultra-scale computing applications. Different definitions of Computing Continuum exist, such as the one in [1], which focuses on integrating resources from the edge to the cloud to support dynamic, data-driven applications, or the approach in [2], which introduces a “Markov Blanket”-based methodology to manage distributed systems, overcoming current limitations and establishing a more flexible framework.

The contemporary computing landscape is dynamic, heterogeneous, and vast, necessitating a paradigm shift for effective management and orchestration of applications across this complex ecosystem. The Computing Continuum extends beyond the traditional cloud model, incorporating entities like edge devices, fog nodes, and the IoT, all contributing to the continuum by providing analysis, processing, storage, and data generation capabilities.

Architecturally, a Computing Continuum system encompasses large-scale, complex, and distributed systems, combining parallel computing, heterogeneity, scalability, and large data volumes. Applications within this continuum often scale by orders of magnitude, similar to ultra-scale computing systems [3]. However, while ultra-scale computing focuses on extending individual systems, the Computing Continuum seeks to unify computing resources into a seamless continuum. The shared architectural features suggest that ultra-scale computing systems can be components of a Computing Continuum.

The primary objective in application deployment within the continuum is to leverage its extensive capabilities. This includes the low latency and proximity benefits of edge computing and the scalability of cloud data centers, as well as the integration of resources across edge, core, and data paths to support dynamic, flexible, data-driven workflows. Effective orchestration is crucial in this context.

Orchestration systems automate the seamless delivery of applications across diverse cloud environments, ensuring that Quality of Service (QoS) objectives are met. These systems manage tasks like resource selection, deployment, monitoring, and runtime control. The rise of DevOps has significantly transformed software development and delivery, emphasizing collaboration and agility. The synergy between orchestration and DevOps strengthens the Computing Continuum by fostering efficiency, flexibility, and resilience in managing applications across diverse architectures.

This work is divided into four sections. The first one will address topics related to the concept of the Computing Continuum and related works (the bibliography is extensive, so individual articles may be omitted). The second will present the contributions of orchestration and DevOps CI/CD to the Computing Continuum. The third will discuss how the contributions of Synergy into Apps, Orchestrations, Devops and infrastructure section relate to those outlined in the concept of Computing Continuum and related works section. Finally, the fourth section will present the conclusions of this work. It should be noted that this study is an exploration of the extensive theory surrounding the concept of the Computing Continuum, the characterization of the challenges to be faced, and proposals for potential solutions based on well-defined topics (Orchestration and DevOps). This is why we do not include use cases in this work.

CONCEPT OF COMPUTING CONTINUUM AND RELATED WORKS

The Computing Continuum has evolved over nearly a decade, propelled by advancements such as diverse cloud services, the surge in computing [4] and data manipulation [5] capabilities in fog and edge devices, the democratization of IoT through open hardware initiatives, and the adoption of DevOps culture. DevOps integrates repositories, development, deployment, and operations with orchestrators, facilitating the efficient management of large-scale data across multiple architectures. Conceptually, the Computing Continuum unifies various computing resources with distinct capabilities and characteristics.

Fog and cloud computing address challenges like quality of service [6] and security [7] in SDN and NFV environments, enabling applications in sectors such as agriculture 4.0 [8]. The digital transformation and IoT require new strategies, highlighting the importance of time-aware data spaces for scalability [9]. Fog computing extends cloud services to the network edge, supporting IoT, 5G, and AI applications [10]. The cloud-to-things continuum, integrated with technologies like iCloudFog [11, 12], manages latency-sensitive IoT data and addresses resource management and security challenges, facilitating real-time applications like tsunami warning systems [13].

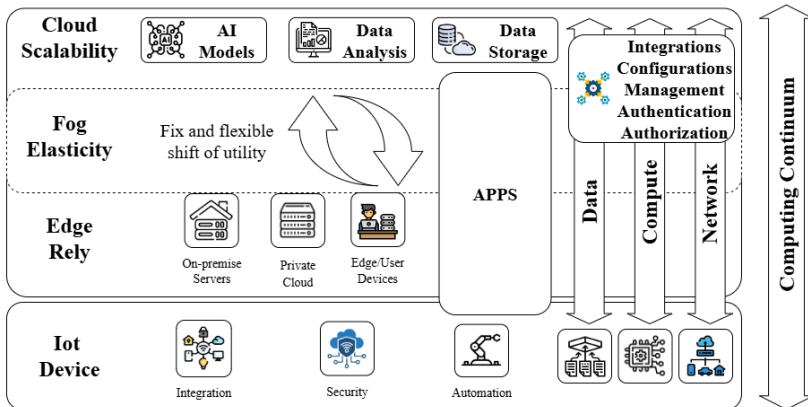


Figure 1. Representation of a Computing Continuum Concept.

Optimizing resources in IoT-fog-cloud environments is crucial [14]. Rule-based resource matching [15] and emulation approaches [16, 17] enhance service placement, maximizing performance in computing continua. Serverless computing [18] and dynamic function distribution offer scalable solutions for complex applications [19]. Tools like Continuum Deployer [20] and models like CODA [21] optimize application and service allocation, considering performance, carbon footprint [22], and quality of service. Innovative approaches like EPOS Fog [23] and the Markov Blanket concept [24] improve efficiency in distributed environments [25].



Key features of the Computing Continuum include minimizing latency [21] and optimizing data processing [15] by distributing computational tasks across edge, fog, and cloud levels [14], enhancing overall system performance [25, 26, 27].

A conceptual architecture of a Computing Continuum system, as depicted in Fig. 1, identifies different elements and levels, illustrating their relationships across varying scales, while considering application behavior and data characteristics. This representation extends beyond the conventional cloud model, incorporating edge, fog, and IoT entities that contribute to the continuum by offering analysis, processing, storage, and data generation capabilities [6].

This evolution, underscored by integrating DevOps with these entities, highlights the dynamic nature of modern computing paradigms [11]. Central to this concept is the ACDC (Application Choose Device Carefully) proposal [28], which emphasizes the flexibility and scalability of deploying general-purpose systems across diverse devices. Orchestrators play a crucial role in automating application delivery across environments, though orchestrating this continuum requires solutions that ensure efficient execution and robust security, which will be addressed in the next section.

SYNERGY INTO APPS, ORCHESTRATIONS, DEVOPS, AND INFRASTRUCTURE

Orchestration Across Multiple Architectures

Orchestration systems play a pivotal role in automating the seamless delivery of applications across diverse cloud environments, ensuring various Quality of Service (QoS) goals are met. These systems manage complex tasks such as resource selection, deployment, monitoring, and runtime control [29]. Across this spectrum, a plethora of solutions exist, ranging from vendor-specific offerings like Amazon's AWS CloudFormation [30], Openstack orchestration [31], Microsoft Azure's Resource Manager (ARM) templates [32], Google cloud deployment manager [33], to open-source cloud-agnostic initiatives like Kubernetes [34], Docker Swarm [35], Apache Brooklyn [36], Cloudify orchestration platform [37], Cloudiator [38], Alien4Cloud [39] and MiCADO-Edge [40].

Traditional cloud architectures often fall short when confronted with the demands of Fig. 1, paving the way for emerging paradigms like fog computing, edge computing, and compute continuum. Fog computing serves as an intermediary layer between the cloud and edge, spanning across multiple network topology layers [41]. Conversely, edge computing involves nodes close to IoT devices, often embedded within them [42]. Fig. 1 extends the cloud by integrating energy-efficient and low-latency devices closer to data sources at the network edge [22]. This amalgamation of fog, edge, and IoT entities endows diverse capabilities such as analysis, processing, storage, and data generation [43].

However, extending orchestration requirements to encompass this Fig. 1 poses a new challenge, as existing solutions struggle to address its diverse and heterogeneous nature [44]. Challenges include federated coordination across administrative domains, volatility and mobility management, and efficient monitoring mechanisms [45]. Orchestration



solutions must adapt to these challenges by offering efficient runtime mechanisms, enforcing policy-based deployment, and reconfiguring to meet SLA goals [46]. With the scale of Fig. 1 being massive, orchestration systems must ensure security against various attack scenarios while minimizing user configuration needs [47].

Recent studies have delved into the challenges and opportunities of orchestration in heterogeneous computing environments, with a particular focus on fog computing [44]. They analyze advanced orchestration architectures and systems to effectively manage the Internet of Things [48], presenting a framework to evaluate the business value of emerging technologies such as fog, edge, and 5G [49]. The orchestration of IoT services in fog environments presents challenges due to system heterogeneity and dynamics. This is explored with solutions based on genetic algorithms and adapting cloud frameworks [50], in addition to analyzing the integration of edge and fog resources in 5G [51, 52] and 6G networks, using artificial intelligence to improve orchestration [53].

The challenges and opportunities of orchestration in IoT systems are explored, analyzing existing approaches and tools [54], as well as cloud-based and edge-based architectures [55]. Research gaps are identified, and innovative solutions are proposed [56], such as artificial intelligence and Kubernetes technologies, to address the requirements of real-time processing, fault tolerance, and other key features [57]. Furthermore, the challenges of orchestration in cloud-edge and fog environments are explored, with a focus on smart city and IoT applications [58]. Architectures such as Kubernetes are analyzed, as well as security and privacy techniques to ensure data protection in these environments [59, 60]. Additionally, frameworks based on microservices and containers are proposed to provide secure and intelligent solutions at the network edge [61].

Culture DevOps

The rise of DevOps culture has transformed software development and delivery, promoting a collaborative and agile approach that departs from traditional waterfall methodologies. DevOps focuses on bridging the gap between development and operations teams by fostering collaboration and automating processes throughout the software development lifecycle. In Cyber-Physical Production Systems (CPPS), DevOps faces unique challenges due to long-term investments, limited flexibility in asset-heavy environments, and the physical nature of hardware [62]. Addressing these challenges requires tailored approaches to ensure successful implementation.

The proliferation of DevOps tools mirrors the Cambrian explosion, with specialized tools emerging to address specific aspects of the software value stream [63]. This diversification is driven by the need for faster lead times, smaller batch sizes, and increased automation. The democratization of the toolchain, fueled by open-source technologies like Git, empowers practitioners to choose tools that best suit their needs, rather than following a one-size-fits-all model [64].

As the software development landscape evolves, adopting DevOps practices becomes crucial for organizations aiming to stay competitive in a fast-paced market [65]. However, the path to DevOps implementation is fraught with challenges. A significant barrier is the shortage of skilled professionals proficient in DevOps methodologies [66]. Recruiting and retaining talent, along with the steep learning curve associated with new tools and



processes, complicates adoption and necessitates comprehensive training programs [67]. Additionally, resistance to change and uncertainty within organizations impede DevOps adoption, requiring effective change management strategies [68].

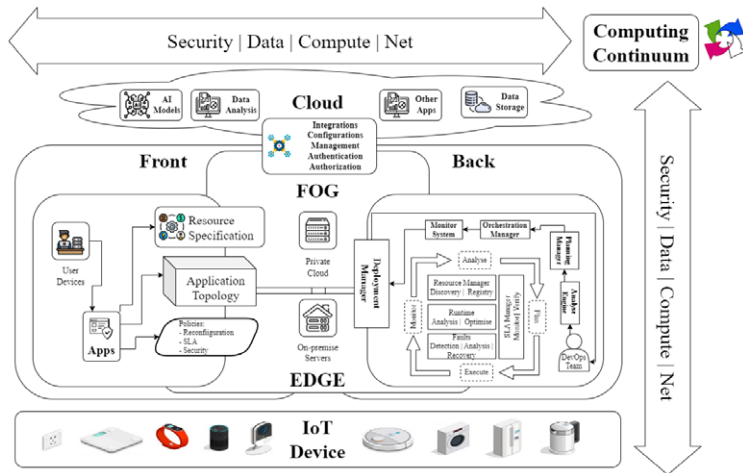


Figure 2. Synergy into apps, orchestrations, and infrastructure.

Infrastructure challenges, as illustrated in Fig. 2, also hinder the smooth integration of DevOps practices [69]. Organizations must develop a robust infrastructure capable of supporting DevOps, addressing issues related to design, provisioning, and hardware/software problem-solving [70]. The size and maturity of an organization further impact its ability to successfully implement DevOps, particularly in larger corporations with complex legacy systems [71]. Transitioning from outdated platforms demands significant resource investment and careful planning.

Siloed communication channels obstruct team collaboration, as teams accustomed to working separately may struggle with the cross-functional collaboration essential to DevOps [72]. Overcoming these barriers requires cultivating a culture of transparency, open communication, and shared responsibility. Additionally, maintaining strong security measures in the context of accelerated release timelines is a significant challenge [73]. Rapid deployments and continuous delivery can compromise security evaluations, making it crucial to bridge the communication gap between development and security teams.

The constant evolution of DevOps processes necessitates adaptability and a commitment to continuous improvement and learning [70]. The growing demand for user experiences tailored to specific roles has led vendors to specialize their offerings, fueling the expansion of the DevOps toolchain. This specialization reflects the evolutionary nature of the market, where vendors cater to the diverse needs of organizations developing increasingly complex software.

The synergy between DevOps and orchestration systems enhances resource utilization and scalability, emphasizing automation and collaboration. This alignment is vital for navigating the complexities of the Computing Continuum, ensuring seamless



deployment across diverse architectures and fostering innovation and security, as depicted in Fig. 2. This transition represents a transformative journey towards greater efficiency and resilience in modern software development.

DISCUSSION

The integration of orchestration systems and DevOps practices within the Computing Continuum as shown in Fig. 2 represents a powerful synergy that addresses many of the challenges associated with managing heterogeneous and distributed computing environments. This synergy is highlighted in Table 1, which outlines the relationship between various computing architectures and their performance, offering a clear view of how these technologies interact to create a more efficient and resilient computing infrastructure.

TABLE 1. Relationship between Computing Continuum References (Architecture and Performance)

Architecture / Performance	Reference
Cloud	[6, 7, 12, 13, 16, 18, 20–22, 25, 29, 30, 32, 43, 51, 54, 55, 57]
Fog	[6, 10–22, 25–27, 41, 44, 47–51, 53, 54, 57–61]
Edge	[6, 9, 13–16, 18–27, 36–42, 44, 46–61]
IoT	[6–8, 12–14, 18–27, 41, 43–61]
Anywhere	[14, 16–27, 44–61]

Orchestration systems such as Kubernetes and Docker Swarm play a pivotal role in managing the complex landscape of the Computing Continuum by automating the deployment, scaling, and management of applications across diverse environments, from the cloud to the edge. These systems are essential for ensuring that (QoS) goals are met, particularly in dynamic and distributed computing environments where resource heterogeneity and geographical distribution present significant challenges [29]. The ability of orchestration systems to handle resource selection, deployment, and runtime control is crucial for optimizing resource utilization and minimizing latency across the continuum [30, 34]. This is particularly important in scenarios where real-time processing and fault tolerance are critical, as these systems can dynamically adjust to changing conditions and maintain service continuity.

The integration of DevOps culture within the orchestration framework further enhances the effectiveness of these systems. DevOps practices emphasize automation, collaboration, and continuous improvement, breaking down traditional silos between development and operations teams and fostering a culture of shared responsibility. This alignment between orchestration and DevOps enables organizations to achieve greater efficiency, flexibility, and resilience in their computing infrastructure [64]. By automating the integration, testing, and delivery of software artifacts, DevOps ensures that development and operations teams work seamlessly together to deliver and maintain applications across the Computing Continuum [44, 66, 67].



The convergence of orchestration and DevOps within the Computing Continuum also enhances security by automating security measures and enforcing policy-based deployment and configuration. This is critical in environments where applications and data span multiple architectures, including cloud, edge, and IoT devices. The security mechanisms provided by orchestration systems help mitigate the challenges of volatility, mobility management, and security, ensuring that the Computing Continuum remains secure and resilient against various threats [44, 69].

Despite the clear benefits, implementing an integrated Computing Continuum with DevOps practices is not without challenges. The complexity of coordinating across multiple administrative domains, managing resource volatility, and ensuring efficient and secure monitoring are significant obstacles. Additionally, the shortage of skilled DevOps professionals and organizational resistance to change can hinder the adoption and success of these practices. Overcoming these challenges requires effective change management strategies and robust training programs to equip teams with the necessary skills [42, 6, 69, 72].

The synergy between orchestration systems and DevOps practices is essential for navigating the complexities of the Computing Continuum. As illustrated in Table 1, this synergy enhances the efficiency, scalability, and security of computing environments, enabling organizations to adapt quickly to evolving demands and technological advancements. Future research should focus on developing more adaptive and secure orchestration solutions, as well as exploring strategies for training and organizational change that facilitate the successful integration of DevOps within the Computing Continuum.

CONCLUSION

In conclusion, the Computing Continuum represents a transformative and integrated ecosystem that encompasses the entire spectrum of computing resources, from the network edge to the cloud. This paradigm integrates a variety of computing architectures—cloud, fog, edge, and IoT—into a unified system designed to deliver scalable, efficient, and resilient solutions. The evolution of this concept is driven by advances in cloud services, the increasing adoption of edge and fog computing, the rise of open hardware initiatives, and the incorporation of DevOps practices.

At its core, the Computing Continuum aims to reduce latency and optimize data processing by distributing computational tasks across multiple layers. This strategic approach enhances resource utilization and system performance by enabling the simultaneous execution of workloads on edge, fog, and cloud tiers. The seamless integration of these architectures, supported by containerization technologies and orchestration, provides the flexibility and agility necessary to meet diverse application requirements.

Furthermore, the integration of DevOps within the Computing Continuum strengthens its capabilities by fostering collaboration and automation. DevOps practices dissolve traditional barriers between development and operations teams, enabling more efficient and scalable application deployment across heterogeneous environments. This synergy addresses critical challenges such as federated coordination, volatility management, and security, thereby ensuring robust and adaptable computing infrastructures.



The Computing Continuum signifies a pivotal shift in computing paradigms, expanding beyond traditional cloud models to incorporate edge, fog, and IoT devices. By clearly defining the elements, contexts, and relationships within this ecosystem, the Computing Continuum emerges as a scalable and distributed computing system, capable of supporting a wide range of applications with varying demands. However, the orchestration of such a complex and heterogeneous system presents challenges, including managing resource capabilities, data diversity, resilience, mobility, and the scalability of applications. Overcoming these challenges is crucial to fully unlocking the potential of the Computing Continuum in the modern computing landscape.

In essence, the Computing Continuum is an abstract that offers a unifying approach to computing resources. By integrating diverse architectures and leveraging innovative technologies, it can deliver scalable, efficient, and resilient solutions. What truly distinguishes the Computing Continuum is its focus on minimizing latency and optimizing data processing through the simultaneous execution of tasks across multiple computing layers, a capability made possible by containerization technologies and DevOps practices.

ACKNOWLEDGEMENTS

It is with great pleasure that we acknowledge the invaluable contribution of Collaboration France-Colombie en Technologies Avancées de l'Information et la Communication (CATAI) in facilitating the collaboration between the Universidad Industrial de Santander (UIS) and Inria. Your support has not only enabled us to achieve our research goals but has also strengthened the ties between our two institutions.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Pablo Josue Rojas Yepes contributed to the roles of Investigation, Methodology, and Writing – Original Draft. He led the methodological design, executed the experiments, and prepared the initial manuscript.

Carlos Jaime Barrios Hernández participated in Validation, Project Administration, Supervision, and Funding Acquisition. He ensured the quality of the results, managed project activities, and secured the necessary financial resources.

Oscar Carrillo performed roles in Validation, Formal Analysis, Supervision, and Writing – Review & Editing. His contributions included detailed data analysis, academic supervision of the work, and critical review of the manuscript.

Frédéric Le Mouël participated in Validation, Conceptualization, Project Administration, and Supervision. His contributions involved defining the conceptual approach, securing funding, managing the project, and providing strategic guidance.

CONFLICT OF INTEREST

Authors declare they have no conflicts of interest in this research.

REFERENCES

- [1] Balouek, D., Renart, E. G., Zamani, A. R., Simonet-Boulogne, A., & Parashar, M. (2019). Towards a computing continuum: Enabling edge-to-cloud integration for data-driven workflows. *The International Journal of High Performance Computing Applications*, 33(6), 1159–1174. <http://dx.doi.org/10.1177/1094342019877383>
- [2] Dustdar, S., Casamayor Pujol, V., & Donta, P. K. (2022). On distributed computing continuum systems. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 35(4), 4092–4105. https://dsg.tuwien.ac.at/team/sd/papers/Zeitschriftenartikel_2022_SD_On_Distributed.pdf
- [3] Carretero, J., García-Blas, J., & Ciegis, R. (2016). Introduction to sustainable ultrascale computing systems and applications. *Journal of Supercomputing*, 72(10), 4043–4046. <https://doi.org/10.1007/s11227-016-1822-8>
- [4] Matsuoka, S. (2018). Cambrian Explosion of Computing and Big Data in the Post-Moore Era. In *Proceedings of the 27th International Symposium on High-Performance Parallel and Distributed Computing (HPDC '18)* (pp. 1–2). ACM. <https://doi.org/10.1145/3208040.3225055>
- [5] Matsuoka, S., Hanawa, T., Endo, T., Amano, H., Nakajima, K., Inoue, K., Kudoh, T., Maruyama, N., Taura, K., Iwashita, T., Katagiri, T. (2016). From FLOPS to BYTES: Disruptive change in high-performance computing towards the post-Moore era. In *CF '16: Proceedings of the ACM International Conference on Computing Frontiers* (pp. 274–281). ACM. <http://dx.doi.org/10.1145/2903150.2906830>
- [6] Gupta, H., Nath, S. B., Chakraborty, S., & Ghosh, S. K. (2016). SDFog: A software defined computing architecture for QoS aware service orchestration over edge devices. *arXiv preprint arXiv:1609.01190*. <http://dx.doi.org/10.48550/arXiv.1609.01190>
- [7] Kahvazadeh, S., Masip, X., Marin-Tordera, E., & Gómez-Cárdenas, A. (2019). Securing combined fog-to-cloud systems: Challenges and directions. In L. A. D. Al-Sakran, B. Ko, S. C. Mishra, & M. S. Obaidat (Eds.), *FTC 2019: Proceedings of the Future Technologies Conference (FTC) 2019* (pp. 877–892). http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-32520-6_63
- [8] Xhafa, F., & Krause, P. (2021). IoT-based computational modeling for next generation agro-ecosystems: Research issues, emerging trends and challenges. In F. Xhafa & A. T. H. Yachia (Eds.), *IoT-Based Intelligent Modelling for Environmental and Ecological Engineering* (pp. 1–21). <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-71172-6>
- [9] Zeiner, H., & Unterberger, R. (2021). Time-aware data spaces—A key computing unit in the edge-to-cloud continuum. In *2021 FiCloud: Proceedings of the 9th IEEE International Conference on Future Internet of Things and Cloud* (pp. 250–255). IEEE. <https://doi.org/10.1109/FiCloud49777.2021.00043>
- [10] Chiang, M., & Zhang, T. (2016). Fog and IoT: An overview of research opportunities. *IEEE Internet of Things Journal*, 3(6), 854–864. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2016.2584538>
- [11] Coughlin, T. (2017). Convergence through the cloud-to-thing consortium [future directions]. *IEEE Consumer Electronics Magazine*, 6(3), 14–17. <http://dx.doi.org/10.1109/MCE.2017.2684914>
- [12] Peng, L., Dhaini, A. R., & Ho, P. (2018). Toward integrated cloud-fog networks for efficient IoT provisioning: Key challenges and solutions. *Future Generation Computer Systems*, 88(8), 606–613. <http://dx.doi.org/10.1016/j.future.2018.05.015>
- [13] Balouek, D., Renart, E. G., Zamani, A. R., Simonet-Boulogne, A., & Parashar, M. (2019). Towards a computing continuum: Enabling edge-to-cloud integration for data-driven workflows. *The International Journal of High Performance Computing Applications*, 33(6), 1159–1174. <http://dx.doi.org/10.1177/1094342019877383>
- [14] Spillner, J., Gkikopoulos, P., Buzachis, A., & Villari, M. (2020). Rule-based resource matchmaking for composite application deployments across IoT-fog-cloud continuums. In *2020 IEEE/ACM International Conference on Utility and Cloud Computing (UCC)* (pp. 336–341). <http://dx.doi.org/10.1109/UCC48980.2020.00053>
- [15] Kassir, S., de Veciana, G., Wang, N., Wang, X., & Palacharla, P. (2020). Service placement for real-time applications: Rate-adaptation and load-balancing at the network edge. In *2020 IEEE International Conference on Cloud and Big Data Computing (CSCloud) and 2020 IEEE International Conference on Edge Computing (EdgeCom)* (pp. 207–215). <https://doi.org/10.1109/CSCloud-EdgeCom49738.2020.00044>
- [16] Beckman, P., Dongarra, J., Ferrier, N., Fox, G., Moore, T., Reed, D., & Beck, M. (2020). Harnessing the computing continuum for programming our world. In R. Buyya & S. Dastjerdi (Eds.), *Fog Computing: Theory and Practice* (pp. 215–230). <https://doi.org/10.1002/9781119551713.ch7>



- [17] Luckow, A., Rattan, K., & Jha, S. (2021). Exploring task placement for edge-to-cloud applications using emulation. In *2021 IEEE International Conference on Fog and Edge Computing (ICFEC)* (pp. 79–83). <https://doi.org/10.1109/ICFEC51620.2021.00019>
- [18] Risco, S., Moltó, G., Naranjo, D. M., & Blanquer, I. (2021). Serverless workflows for containerised applications in the cloud continuum. *Journal of Grid Computing, 19*(30). <https://doi.org/10.1007/s10723-021-09570-2>
- [19] Spillner, J. (2021). Self-balancing architectures based on liquid functions across computing continuums. In *2021 IEEE/ACM International Conference on Utility and Cloud Computing (UCC)* (pp. 1–6). IEEE. <https://doi.org/10.1145/3492323.3495589>
- [20] Hass, D., & Spillner, J. (2021). Interactive application deployment planning for heterogeneous computing continuums. In L. T. Yang, M. M. S. Khan, R. S. N. Ochi, & S. N. T. K. Tseng (Eds.), *2021 IEEE International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA)* (pp. 551–560). http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-75078-7_55
- [21] Mehran, N., Kimovski, D., & Prodan, R. (2021). A two-sided matching model for data stream processing in the cloud-fog continuum. In *2021 IEEE International Conference on Cloud Computing (CCGrid)* (pp. 514–524). IEEE. <https://doi.org/10.1109/CCGrid51090.2021.00061>
- [22] Kimovski, D., Mathá, R., Hammer, J., Mehran, N., Hellwagner, H., & Prodan, R. (2021). Cloud, fog, or edge: Where to compute? *IEEE Internet Computing, 25*(4), 30–36. <https://arxiv.org/pdf/2101.10417>
- [23] Nezami, Z., Zamanifar, K., Djemame, K., & Pourmaras, E. (2021). Decentralized edge-to-cloud load balancing: Service placement for the Internet of Things. *IEEE Access, 9*, 64983–65000. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3074962>
- [24] Dustdar, S., Casamayor Pujol, V., & Donta, P. K. (2022). On distributed computing continuum systems. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 35*(4), 4092–4105. <https://doi.org/10.1109/TKDE.2022.3142856>
- [25] Spillner, J., Borin, J. F., & Bittencourt, L. F. (2022). Intent-based placement of microservices in computing continuums. In M. Klymash, M. Beshley, & A. Luntovskyy (Eds.), *Future Intent-Based Networking* (pp. 38–50). https://doi.org/10.1007/978-3-030-92435-5_3
- [26] Milojević, D. (2020). The edge-to-cloud continuum. *Computer, 53*(11), 16–25. <https://doi.org/10.1109/MC.2020.3007297>
- [27] Rosendo, D., Silva, P., Simonin, M., Costan, A., & Antoniu, G. (2020). E2clab: Exploring the computing continuum through repeatable, replicable and reproducible edge-to-cloud experiments. In *2020 IEEE International Conference on Cluster Computing (CLUSTER)* (pp. 176–186). IEEE. <https://doi.org/10.1109/CLUSTER49012.2020.00028>
- [28] Rojas Yepes, P. J., Barrios Hernandez, C. J., & Steffemel, L. A. (2022). A Methodology for Evaluating the Energy Efficiency of Post-Moore Architectures. In *High Performance Computing. CARLA 2021. Communications in Computer and Information Science* (Vol. 1540). https://doi.org/10.1007/978-3-031-04209-6_4
- [29] Tomarchio, O., Calcaterra, D., & Di Modica, G. (2020). Cloud resource orchestration in the multi-cloud landscape: A systematic review of existing frameworks. *Journal of Cloud Computing, 9*(1), 1–25. <https://doi.org/10.1186/s13677-020-00194-7>
- [30] Amazon. (2024). *Aws cloudformation: Speed up cloud provisioning with infrastructure as code*. Retrieved May 4, 2024, from <https://aws.amazon.com/cloudformation/>
- [31] OpenStack. (2024). *Openstack orchestration*. OpenStack Wiki. <https://wiki.openstack.org/wiki/Heat>
- [32] Azure. (2024). *Azure Resource Manager (ARM) templates*. Microsoft Learn. <https://docs.microsoft.com/en-us/azure/azure-resource-manager/templates/overview>
- [33] Google. (2024). *Google Cloud Deployment Manager*. Google Cloud. <https://cloud.google.com/deployment-manager>
- [34] Kubernetes. (2024). *Kubernetes: Production-grade container orchestration*. <https://kubernetes.io/>
- [35] Docker. (2024). *Docker Swarm*. Docker Documentation. <https://docs.docker.com/engine/swarm/>
- [36] Apache Brooklyn. (2024). *Apache Brooklyn: Software for managing cloud applications*. <https://brooklyn.apache.org/>
- [37] Cloudify. (2024). *Cloudify orchestration platform - Multi cloud, cloud native & edge*. <https://cloudify.co/>
- [38] Cloudiator. (2024). *Cloudiator: A multi-tenant, cross-cloud orchestration framework*. GitHub. <https://github.com/cloudiator>
- [39] Alien4Cloud. (2024). *Alien 4 Cloud*. <https://alien4cloud.github.io/>



- [40] Ullah, A., Dagdeviren, H., Ariyattu, R. C., Casale, G., & Pllana, S. (2021). MiCADO-Edge: Towards an application-level orchestrator for the cloud-to-edge computing continuum. *Journal of Grid Computing*, 19(4), 47. <https://doi.org/10.1007/s10723-021-09589-5>
- [41] IEEE. (2018). IEEE standard for adoption of openfog reference architecture for fog computing. *IEEE Std 2018*, 1–176. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2018.8423800>
- [42] Kimovski, D., Mathá, R., Hammer, J., Mehran, N., Hellwagner, H., & Prodan, R. (2021). Cloud, fog, or edge: Where to compute? *IEEE Internet Computing*, 25(4), 30–36. <https://arxiv.org/pdf/2101.10417>
- [43] Moreschini, S., Pecorelli, F., Li, X., Naz, S., Hästbacka, D., & Taibi, D. (2022). Cloud continuum: The definition. *IEEE Access*, 10, 131876–131886. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3229185>
- [44] Svorobej, S., Bendeche, M., Griesinger, F., & Domaschka, J. (2020). Orchestration from the Cloud to the Edge. In T. Lynn, J. G. Mooney, B. Lee, & P. T. Endo (Eds.), *The Cloud-to-Thing Continuum: Opportunities and Challenges in Cloud, Fog and Edge Computing* (pp. 61–77). Springer International Publishing, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-41110-7_4
- [45] Bittencourt, L., Immich, R., Sakellariou, R., Fonseca, N., Madeira, E., Curado, M., Villas, L., DaSilva, L., Lee, C., & Rana, O. (2018). The internet of things, fog and cloud continuum: Integration and challenges. *Internet of Things*, 3-4, 134–155. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2018.09.005>
- [46] DesLauriers, J., Kiss, T., Ariyattu, R. C., Dang, H.-V., Ullah, A., Bowden, J., Krefting, D., Pierantoni, G., & Terstysnszky, G. (2021). Cloud apps to-go: Cloud portability with TOSCA and MiCADO. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, 33(19), e6093. <https://doi.org/10.1002/cpe.6093>
- [47] Ullah, A., Dagdeviren, H., Ariyattu, R. C., DesLauriers, J., Kiss, T., & Bowden, J. (2021). MiCADO-Edge: Towards an application-level orchestrator for the cloud-to-edge computing continuum. *Journal of Grid Computing*, 19(4), 1–28. <https://doi.org/10.1007/s10723-021-09589-5>
- [48] Velasquez, K., Abreu, D. P., Assis, M. R., Senna, C., Aranha, D. F., Bittencourt, L. F., Laranjeiro, N., Curado, M., Vieira, M., Monteiro, E., & Madeira, E. (2018). Fog orchestration for the Internet of Everything: State-of-the-art and research challenges. *Journal of Internet Services and Applications*. <https://doi.org/10.1186/s13174-018-0086-3>
- [49] Lynn, T., Mooney, J. G., Lee, B., & Endo, P. T. (2020). *The cloud-to-thing continuum: Opportunities and challenges in cloud, fog and edge computing*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-41110-7>
- [50] Wen, Z., Yang, R., Garraghan, P., Lin, T., Xu, J., & Rovatsos, M. (2017). Fog orchestration for internet of things services. *IEEE Internet Computing*, 21(2), 16–25. <https://doi.org/10.1109/MIC.2017.36>
- [51] Jiang, Y., Huang, Z., & Tsang, D. H. (2018). Challenges and solutions in fog computing orchestration. *IEEE Network*, 32(1), 12–19. <https://doi.org/10.1109/MNET.2017.1700271>
- [52] Comma-Di, L., Abdullaziz, O. I., Antevski, K., Chundrigar, S. B., Gdowski, R., Kuo, P. H., Mourad, A., Yen, L. H., & Zabala, A. (2018). Opportunities and challenges of joint edge and Fog orchestration. In *2018 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW)* (pp. 53–58). IEEE. <https://doi.org/10.1109/WCNCW.2018.8369006>
- [53] Velasquez, K., Abreu, D. P., Curado, M., & Monteiro, E. (2022). Resource orchestration in 5G and beyond: Challenges and opportunities. *Computer Communications*, 192, 311–315. <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2022.06.019>
- [54] Nguyen, P. H., Ferry, N., Erdogan, G., Song, H., Lavirotte, S., Tigli, J. Y., & Solberg, A. (2019). Advances in deployment and orchestration approaches for IoT—A systematic review. In *Proceedings - 2019 IEEE International Congress on Internet of Things, ICIOT 2019 - Part of the 2019 IEEE World Congress on Services* (pp. 129–136). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICIOT.2019.00021>
- [55] Wu, Y. (2020). Cloud-edge orchestration for the Internet of Things: Architecture and AI-powered data processing. *IEEE Internet of Things Journal*, 8(16), 12792–12805. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.3014845>
- [56] Vaquero, L. M., Cuadrado, F., Elkhatib, Y., Bernal-Bernabe, J., Srirama, S. N., & Zhani, M. F. (2019). Research challenges in nextgen service orchestration. *Future Generation Computer Systems*, 94, 780–792. <https://doi.org/10.1016/j.future.2018.07.039>
- [57] Böhm, S., & Wirtz, G. (2022a). Towards orchestration of cloud-edge architectures with Kubernetes. In *Science and Technologies for Smart Cities: 7th EAI International Conference, SmartCity360, Virtual Event, December 2-4, 2021, Proceedings* (Vol. 423, pp. 207–230). http://dx.doi.org/10.1007/978-3-031-06371-8_14



- [58] Böhm, S., & Wirtz, G. (2022). Cloud-edge orchestration for smart cities: A review of Kubernetes-based orchestration architectures. *EAI Endorsed Transactions on Smart Cities*, 6(18), e2–e2. <https://doi.org/10.4108/eetsc.v6i18.1197>
- [59] Fakude, N. C., Tarwireyi, P., Adigun, M. O., & Abu-Mahfouz, A. M. (2019). Fog orchestrator as an enabler for security in fog computing: A review. In *Proceedings - 2019 International Multidisciplinary Information Technology and Engineering Conference (IMITEC)* (pp. 1–6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IMITEC45504.2019.9015896>
- [60] Šatkauskas, N., Venčkauskas, A., Morkevičius, N., & Liutkevičius, A. (2020). Orchestration security challenges in the fog computing. In A. Venčkauskas, A. M. S. Elgohary, & M. M. R. M. N. (Eds.), *Information and Software Technologies: 26th International Conference, ICIST 2020, Kaunas, Lithuania, October 8–9, 2020, Proceedings* (pp. 196–207). http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-59506-7_17
- [61] Al-Doghman, F., Moustafa, N., Khalil, I., Sohrabi, N., Tari, Z., & Zomaya, A. Y. (2023). AI-enabled secure microservices in edge computing: Opportunities and challenges. *IEEE Transactions on Services Computing*, 16(2), 1485–1504. <https://doi.org/10.1109/TSC.2022.3155447>
- [62] Koren, I., Rinker, F., Meixner, K., Matevska, J., & Walter, J. (2023). Challenges and opportunities of DevOps in cyber-physical production systems engineering. In *2023 IEEE 6th International Conference on Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS)* (pp. 1–6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICPS58381.2023.10128073>
- [63] Kersten, M. (2018). A Cambrian Explosion of DevOps Tools. *IEEE Software*, 35(2), 14–17. <https://doi.org/10.1109/MS.2018.1661330>
- [64] Kim, G., Humble, J., Debois, P., & Willis, J. (2016). *The DevOps handbook: How to create world-class agility, reliability, and security in technology organizations*. IT Revolution.
- [65] Smeds, J., Nybom, K., & Porres, I. (2015). DevOps: A definition and perceived adoption impediments. In *International Conference on Agile Software Development* (pp. 166–177). https://doi.org/10.1007/978-3-319-18612-2_14
- [66] Chen, L. (2018). Continuous delivery at scale: Challenges and opportunities. In *2018 IEEE/ACM 4th International Workshop on Rapid Continuous Software Engineering (RCoSE)* (p. 42). IEEE. <https://doi.org/10.1145/3194760.3194764>
- [67] Senapathi, M., Buchan, J., & Osman, H. (2018). DevOps capabilities, practices, and challenges: Insights from a case study. In *Proceedings of the 22nd International Conference on Evaluation and Assessment in Software Engineering 2018* (pp. 1–10). ACM. <https://doi.org/10.1145/3210459.3210465>
- [68] Riungu-Kalliosaari, L., Mäkinen, S., Lwakatare, L. E., Tiihonen, J., & Männistö, T. (2016). DevOps adoption benefits and challenges in practice: A case study. In *Product-Focused Software Process Improvement: 17th International Conference, PROFES 2016, Trondheim, Norway, November 22–24, 2016, Proceedings 17* (pp. 590–597). https://doi.org/10.1007/978-3-319-49094-6_44
- [69] Azad, N., & Hyrnsalmi, S. (2023). DevOps critical success factors — A systematic literature review. *Information and Software Technology*, 157, 107150. <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2023.107150>
- [70] Trigo, A., Varajão, J., & Sousa, L. (2022). DevOps adoption: Insights from a large European Telco. *Cogent Engineering*, 9(1), 2083474. <https://doi.org/10.1080/23311916.2022.2083474>
- [71] Leite, L., Rocha, C., Kon, F., Milojić, D., & Meirelles, P. (2019). A survey of DevOps concepts and challenges. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 52(6), 1–35. <https://doi.org/10.1145/3359981>
- [72] Khan, M. S., Khan, A. W., Khan, F., Khan, M. A., & Whangbo, T. K. (2022). Critical challenges to adopt DevOps culture in software organizations: A systematic review. *IEEE Access*, 10, 14339–14349. <http://dx.doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3145970>
- [73] Zarour, M., Alhammad, N., Alenezi, M., & Alsarayah, K. (2020). DevOps process model adoption in Saudi Arabia: An empirical study. *Jordanian Journal of Computers and Information Technology*, 6(3), 209–224. <http://dx.doi.org/10.5455/jjcit.71-1580581874>

Pol+NBU: A feasibility study in generating high-resolution adversarial images with a black box evolutionary algorithm based attack

Enea Mancellari^{1*}, Ali Osman Topal¹, Franck Leprévost¹

¹ University of Luxembourg, Faculty of Science, Technology and Medicine, Computer Science Department, Esch-sur-Alzette, Luxembourg

*Autor para correspondencia/Corresponding author: enea.mancellari@uni.lu

Pol+NBU: Un estudio de viabilidad en la generación de imágenes adversariales de alta resolución con un ataque basado en algoritmos evolutivos de caja negra

Abstract

Adversarial attacks in the digital image domain pose significant challenges to the robustness of machine learning models. Trained convolutional neural networks (CNNs) are among the leading tools used for the automatic classification of images. They are nevertheless exposed to attacks: given an input clean image classified by a CNN in a category, carefully designed adversarial images may lead CNNs to erroneous classifications, although humans would still classify “correctly” the constructed adversarial images in the same category as the input image. In this feasibility study, we propose a novel approach to enhance adversarial attacks by incorporating a pixel of interest detection mechanism. Our method involves utilizing the BagNet model to identify the most relevant pixels, allowing the attack to focus exclusively on these pixels and thereby speeding up the process of adversarial attack generation. These attacks are executed in the low-resolution domain, and then the Noise Blowing-Up (NBU) strategy transforms the low-resolution adversarial images into high-resolution adversarial images. The Pol+NBU strategy is tested on an evolutionary-based black-box targeted attack against MobileNet trained on ImageNet using 100 clean images. We observed that this approach increased the speed of the attack by approximately 65%.

Keywords: Black-box attack, Convolutional Neural Network, High resolution adversarial image, Noise Blowing-Up method, Pixels of Interest.

Resumen

Los ataques adversariales en el dominio de las imágenes digitales plantean desafíos significativos para la robustez de los modelos de aprendizaje automático. Las redes neuronales convolucionales (CNNs) entrenadas están entre las herramientas principales utilizadas para la clasificación automática de imágenes. Sin embargo, están expuestas a ataques: dada una imagen limpia de entrada clasificada por una CNN en una categoría, las imágenes adversariales diseñadas cuidadosamente pueden llevar a las CNNs a clasificaciones erróneas, aunque los humanos seguirían clasificando “correctamente” las imágenes adversariales construidas en la misma categoría que la imagen de entrada. En



Licencia Creative Commons
Atribución-NoComercial 4.0



Editado por /
Edited by:
Dennis Cazar

Recibido /
Received:
19/11/2024

Aceptado /
Accepted:
24/12/2024

Publicado en línea /
Published online:
21/08/2025



este estudio de viabilidad, proponemos un enfoque novedoso para mejorar los ataques adversariales mediante la incorporación de un mecanismo de detección de píxeles de interés. Nuestro método implica el uso del modelo BagNet para identificar los píxeles más relevantes, lo que permite que el ataque se enfoque exclusivamente en estos píxeles y, de esta manera, acelere el proceso de generación de ataques adversariales. Estos ataques se ejecutan en el dominio de baja resolución y, luego, la estrategia de Ampliación de Ruido (Noise Blowing-Up, NBU) transforma las imágenes adversariales de baja resolución en imágenes adversariales de alta resolución. La estrategia Pol+NBU se prueba en un ataque dirigido de caja negra basado en evolución contra MobileNet entrenado en ImageNet, utilizando 100 imágenes limpias. Observamos que este enfoque aumentó la velocidad del ataque en aproximadamente un 65%.

Palabras clave: Ataque de caja negra, Red Neuronal Convolutiva, Imagen adversarial de alta resolución, Método de Ampliación de Ruido, Píxeles de Interés

INTRODUCTION

Convolutional neural networks (CNNs) have become indispensable in the field of computer vision, showcasing exceptional performance across various tasks, particularly in image classification [1, 2, 3]. By leveraging the power of convolutional layers for feature extraction, CNNs excel in identifying intricate patterns and subtleties within visual data. CNN's classifications are represented by output vectors of length equal to the number of categories the CNN is designed to sort images into (e.g., 1000 for those trained on ImageNet [4]). For each category c , the CNN computes a c -label value $\in [0, 1]$ that measures the likelihood that the image belongs to c .

Recently, the vulnerability of CNNs to adversarial attacks has become a topic of significant interest. Attacks involve finding perturbations in input data, often with imperceptible changes to human observers, that lead to misclassification by the model. These vulnerabilities pose significant safety concerns in real-world applications such as self-driving cars, surveillance of sensitive areas, medical diagnoses, etc. However, they can also be exploited to obscure security and privacy-sensitive information from CNN-based threat models aimed at extracting such data from images [5, 6].

In particular, images used on social media are usually high-resolution large size images (they belong to the so-called HR domain). Leprévost et al. [7, 8], detailed the generic *Noise Blowing-Up strategy* (NBU) for generating high-resolution (HR) adversarial images against CNNs. Additionally, the authors presented in [9] the generic *zone-of-interest strategy* (Zol) that originally *a priori* works in the low-resolution (LR) domain.

Our contribution (Subsection 1.1)

The present article, on the one hand, addresses issues remained open in [9], in particular an experimental validation, and, on the other hand, provides the design of a new generic attack that combines the Pixels of Interest (Pol) strategy with the Noise Blowing Up (NBU) method. The resulting Pol+NBU method aims at enhancing the effectiveness



of any type of attack (white-box or black-box) and of any specific attack on CNNs at the creation of HR adversarial images of exceptional visual quality.

This combination works as follows in practice. A clean high-resolution image is reduced to the LR domain to fit the input size of a CNN to attack. The Pol strategy is applied in the LR domain to identify the most relevant areas of an image for its classification by the considered CNN. Then an attack is performed, focusing on these zones, thereby reducing its search space and enhancing its efficiency. The adversarial noise, created that way in limited zones in the LR domain, is blown-up to the HR domain. This noise is then added to the HR clean image, leading to a high-resolution adversarial image, indistinguishable from the original HR clean image for a human eye.

We validate the combined Pol+NBU approach experimentally. Specifically, we employ a variant of the evolutionary algorithm-based (EA) attack described in [10] on 100 high resolution (HR) clean images, targeting the MobileNet CNN [11] trained on ImageNet.

Organisation of the paper (Subsection 1.2)

Section 2 outlines the key theoretical steps of the Pol+NBU strategy. Section 3 lists the targeted CNN, the HR clean images, and the essential features of the EA-based targeted attack used in the experiments. Section 4 presents the outcome of the experiments, including a visual assessment of the quality of the adversarial images obtained through some illustrative images. The Conclusions section summarizes the findings of this paper.

The algorithms and experiments were implemented in Python 3.9 utilizing the NumPy 1.23.5, TensorFlow 2.14.0, Keras 3, and Scikit 0.22 libraries. Computational tasks were executed on nodes equipped with Nvidia Tesla V100 GPUs within the IRIS HPC Cluster at the University of Luxembourg [12]. Additional material (clean images used, their size, example of adversarial images, and source code) can be retrieved at https://github.com/emancellari/PoL_NBU.git

COMBINING THE PIXELS OF INTEREST AND THE NOISE BLOWING-UP STRATEGIES (SECTION 2)

This section provides a rapid overview of the typology of attacks and of attack scenarios (Subsection 2.1). Then it describes the Pol generic strategy (Subsection 2.2) and the NBU strategy (Subsection 2.3). Finally, it gives the overall scheme of the combined Pol+NBU generic strategy (Subsection 2.4).

Typology of attacks and visual expectations (Subsection 2.1)

Attacks are classified according to the level of knowledge an attacker has about the CNN to deceive. In white-box attacks [13, 14, 15], the attacker has complete knowledge of the target CNN's architecture, parameters, and training data, allowing for precise creation of adversarial images, often with high success rates. In contrast, black-box attacks [10, 16, 17, 18] rely only on observing the input-output behavior of the target model, typically requiring more time and resources.



Attack scenarios are manifold. Given a clean image classified by the CNN in a category c_o in the target scenario, one selects a category $c_t \neq c_o$, and one adds adversarial noise to the clean image to create an adversarial image classified by the CNN in c_t . As such, one has defined a *good enough* adversarial image. A τ -strong adversarial image (for $0 < \tau \leq 1$) is an adversarial image classified in c_t with a c_t -label value $\geq \tau$. In the untargeted scenario, the process is similar as in the target scenario, except that one requires the adversarial image to be classified in any category $c \neq c_o$.

Finally, adversarial images can be indistinguishable for a human as compared to the associated clean images, or not. The former requirement is clearly much more challenging than the latter one.

Pixels of Interest (Pol) strategy (Subsection 2.2)

Figure 1 describes the Pol process in the LR domain. One is given a CNN C to deceive, and a clean image A , of size equal to the input size of C (say 224×224 if C is trained on ImageNet), classified by C as belonging to the category c_o with c_o -label value equal to τ_o .

One uses BagNet [19] to identify the pixels relevant for a CNN's classification of the image in c_o (b) and in c_t (d), thanks to a heatmap. Note that one does not specify which CNN we are dealing with, so that making use of BagNet is compliant with the requirements set by black-box attacks. Then we sieve these pixels and keep only the $x\%$ most significant for c_o on the one hand and for c_t on the other hand, where x is fixed at will ((c) and (e)). One merges this information (without redundancy) in (f). The attack is performed on these pixels of interest, leading to an adversarial image classified by C in the target category c_t with a c_t -label value equal to τ_t .

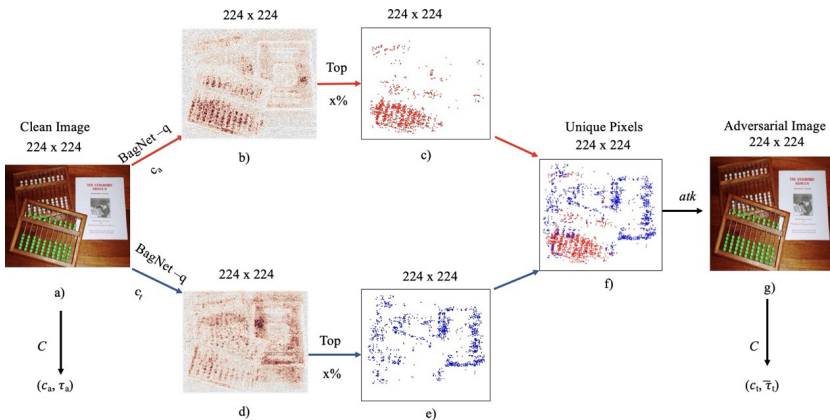


FIGURE 1. Pol process in the LR domain for any attack, any scenario, and any CNN.

Remarks. Firstly, one could use clustering techniques like DBSCAN [20] to encapsulate these top $x\%$ most relevant pixels into larger zones of interest before performing the attack. Doing so presents the advantage of a lesser concentration of the attack on individual

pixels, what may lead to a better visual quality. However, it does not prove true in practice (essentially because an observer notices rectangles on the adversarial images obtained). Moreover, it often implies that very large proportions of the image are subject of the attack, even if one uses only the top 1% most relevant pixels: our experiments showed that one jumps from 4.70% of the image without DBSCAN (see Table 2 and Figure 3 in additional material file), to 65% with DBSCAN, thereby adding a very large proportion of less-relevant pixels to the attack, leading to a slowing down of the process and lesser success rates. In other words, clustering techniques are unlikely to provide any substantial advantage.

Secondly, BagNet acts as a proxy of the CNN to attack but does not substitute it. Therefore, the usage of BagNet is compatible with a black-box attack scheme.

Thirdly, one can see our Pol strategy as a generalisation of the attacks [21, 22], where one or a few pixels are modified to create adversarial images. However, our aim goes beyond, since, as opposed to the aforementioned attacks where a human immediately sees that an attack occurred, we intend to create adversarial images indistinguishable from the original clean image.

Noise Blowing-Up (NBU) strategy (Subsection 2.3)

In a nutshell, in the Noise Blowing-Up (NBU) generic strategy [8] illustrated in Figure 2, a clean HR image is reduced with a resizing interpolation function to fit the CNN C 's input size. c_a denotes the category in which C classifies this resized clean image. Then an attack atk is performed in the LR domain on this image to create an adversarial image classified in $c \neq c_a$ (which may be a predefined category c_t in the target scenario). The adversarial noise is extracted in the LR domain and then blown-up to the HR domain to fit the original clean image size. This blown-up noise is then added to the HR clean image, leading to a HR tentative adversarial image. This image is again processed to fit C 's input size. If C classifies it in c , one has obtained that way a HR adversarial image.

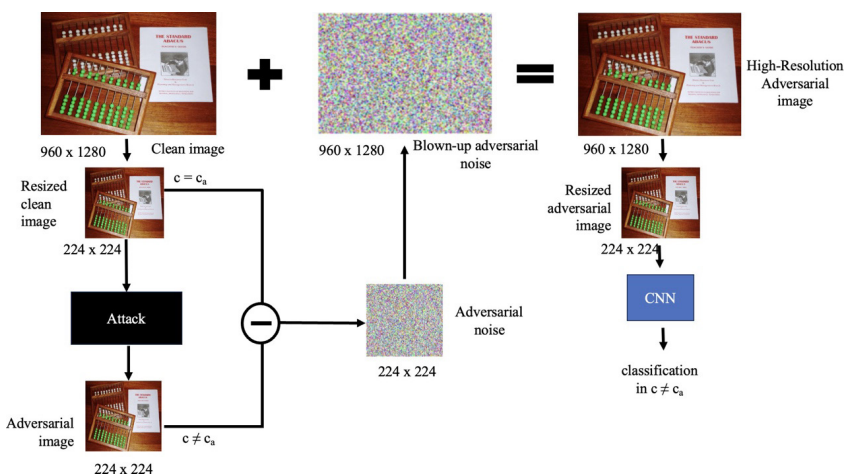


FIGURE 2. The Noise Blowing-Up strategy

Pol+NBU strategy (Subsection 2.4)

The Pol+NBU method illustrated in Figure 3 integrates the Pol strategy with the NBU method to create high-resolution adversarial images effectively. The Pol strategy initially identifies the relevant regions of the resized clean image in the LR domain on which the attack will occur. Once the attack is applied within these zones, the NBU strategy is used to blow up the obtained adversarial noise to the HR domain, and the process continues as in Subsection 2.3.

A key advantage of this approach combining two generic strategies is that the result is again a generic strategy: It applies *a priori* to any attack, any scenario, and any CNN, and it is still a black-box attack.

For attacks that incorporate randomness, such as evolutionary-based attacks, rather than relying on a single substantial attack round which would create a very strong adversarial noise at once, one could also consider performing multiple rounds of moderate attacks, each leading to the creation of moderate noise [9], where for instance each round

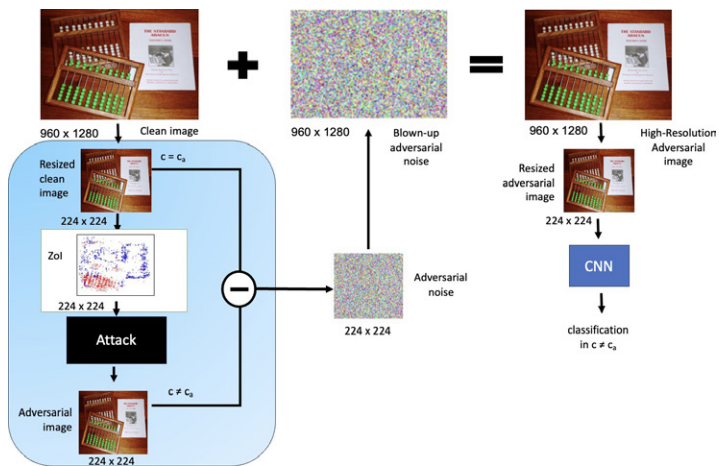


FIGURE 3. The combined Pol+NBU strategy

generates focused adversarial noise within some particular zone of interest. Although none of them would be enough to create a HR adversarial noise, their collaborative efforts may. The successive layers of moderate noise, blown-up and carefully combined, may progressively generate an adversarial image in the HR domain.

FRAMEWORK OF THE EXPERIMENTAL VALIDATION (SECTION 3)

We exposed the Pol strategy on the one hand (working in the LR domain), and the Pol+NBU generic strategy on the other hand (working in the HR domain) to a series of experiments. We specify here the attack scenario and the specific HR images used in the tests (Subsection 3.1), the concrete attack considered (Subsection 3.2), and the CNN to deceive in this feasibility study (Subsection 3.3).



There are essentially three BagNet models that one can use in the Pol part of the combined strategy, namely BagNet-q with $q = 9, 17, 33$. We selected $q = 33$ due to its accuracy and runtime performance, reported in [19].

Regarding Subsection 3.2, let us stress that we were unable to test the strategy against other attacks such as FGSM [23], PGDInf [24], BIM [25], SimBA [26], and AdvGAN [27]. This limitation is due to the lack of full access to the code of these attacks. Note as well that most processes involved can be parallelized, but we did not explore it in the present study.

The attack scenario and the HR clean images (Subsection 3.1)

The experimentation is performed for the target scenario for the 10 pairs (c_a, c_t) of clean-target categories specified in Table 1 (same to those utilized in [10, 28])

TABLE 1. For $1 \leq p \leq 10$, the 2nd row gives the ancestor category c_a and its index number a_p among the categories of ImageNet (Mutatis mutandis for the target categories, 3rd row).

p	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
c_a	abacus	acorn	baseball	broom	brown bear	canoe	hippo	llama	maraca	mountain bike
a_p	398	988	429	462	294	472	344	355	641	671
c_t	bannister	rhinoceros beetle	ladle	dingo	pirate	Saluki	trifle	agama	conch	strainer
t_p	421	306	618	273	724	176	927	42	112	828

For each ancestor category c_a , we picked at random 10 clean ancestor images from the ImageNet validation scheme in c_a , provided that their sizes $h \times w$ satisfy $h \geq 224$ and $w \geq 224$. This ensures that these 100 clean images belong to the HR domain. Additional material (see end of Introduction) contains these images and their original sizes.

Experiments (Subsection 3.2)

Once the pixels of interest are identified, one performs the black-box Evolutionary-based Algorithm (EA) attack [10] (see Algorithm 1 for its pseudo-code) within these regions, while keeping the rest of the pixels untouched.

The attack is executed for the target scenario to create 0.55-strong adversarial images (this ensures a convincing margin ≥ 0.10 with respect to the second best category). The maximum number of generations is set to $N = 10,000$, and the population size is set to 40.

ϵ controls the maximum allowable change in pixel values for the entire image, while α determines the magnitude of change for each pixel in each generation of the EA. These parameters play a crucial role in shaping the nature and magnitude of adversarial perturbations generated by the algorithm. Throughout the experiments, the value of α per generation is fixed at $1/255$.



The EA is initially executed without Pol, with $\epsilon = 8, 12,$ and 16 . Subsequently, it runs with Pol applied to increasing percentages of relevant pixels: the top $x\%$ ($x: 10, 20, 25, 30,$ and 35) of both c_o -label and c_t -label values (taken together without any duplication) as measured by BagNet-33. This leads to 1800 attempts to generate adversarial images within the LR domain. Experience shows that the EA is unable to generate a significant number of adversarial images if $x < 10$, since in this case the proportion of the image affected is too narrow. Therefore, the study considers $x \geq 10$.

Algorithm 1 EA attack pseudocode [10, 18]

- 1: **Input:** CNN C , initial image A , perturbation magnitude α , max perturbation ϵ , ancestor class c_a , target class index t , current generation g , max generations N
- 2: Initialize population: 40 copies of A ; I_0 as the first individual
- 3: Compute fitness for all individuals
- 4: **while** ($O_{I_0}[t] < \tau$) & $g < N$ **do**
- 5: Rank individuals by fitness: top 10 as elite, next 20 as middle class, last 10 as lower class
- 6: Mutate a random number of pixels in middle and lower class individuals with α ; clip mutations to $[-\epsilon, \epsilon]$
- 7: Replace lower class with mutated elite and middle class individuals
- 8: Cross-over individuals to form new population
- 9: Compute fitness for all individuals

CNN: MobileNet (Subsection 3.3)

The feasibility study is performed using MobileNet [11] trained on ImageNet [4]. We selected this CNN because it is optimized (and favored over other CNNs) for applications running on devices with limited processing power, memory, and storage capacity [29]. Examples of recent applications of MobileNet include the classification of freshwater fish on smartphones for farmers [30], the identification of tomato leaf disease in agriculture [31], the detection of skin cancer [32], etc.

Table 2 presents a comparison between MobileNet, the original GoogleNet [33] and VGG16 [34] in terms of the number of parameters, accuracy, and computational resources. MobileNet achieves nearly the same accuracy as VGG16 but with significantly smaller-sized parameters, being 32 times smaller, and requiring 27 times less computational resources (Mult-Adds). MobileNet outperforms GoogleNet in terms of accuracy while being smaller and requiring more than 2.5 times less computational resources.

TABLE 2. MobileNet vs original GoogleNet and VGG16: Details include parameter counts, ImageNet accuracy, and Mult-Adds (M-millions)

Name of the CNN	Parameters	Image-Net Accuracy	Mult-Adds
MobileNet [15]	4.2 M	70.6%	569 M
GoogleNet [29]	6.8 M	69.8%	1550 M
VGG16 [26]	138 M	71.5%	15300 M



OUTCOME OF THE EXPERIMENTS (SECTION 4)

Pol speed-up of the attack in the LR domain (Subsection 4.1)

TABLE 3. Average number of generations required to generate adversarial images (from *acorn1* and *maraca2*) in the LR domain by EA without and with Pol guidance. Results are for $\epsilon = 8, 12, 16$ and the top $x\%$ most relevant pixels for $x = 10, 20, 25, 30, 35$. The speed change is also given in percentages; negative values indicate a slower performance, and positive values a faster performance.

ϵ	EA	EA guided with Pol				
		Top 10%	Top 20%	Top 25%	Top 30%	Top 35%
8	2093	6172	3131	2659	2342	1720
		-195.0%	-49.6%	-27.0%	-11.9 %	17.8%
12	1728	1101	805	827	799	767
		36.3%	53.4%	52.2%	53.7 %	55.6%
16	1787	752	670	607	667	587
		57.9%	62.5%	66.0%	62.7 %	67.2%

Table 3 presents the performance of the EA in generating adversarial images in the LR domain, measured by the number of generations, both with and without Pol guidance. The results are based on *acorn1* and *maraca2* (see Additional material), as the EA successfully generated 0.55-strong adversarial images from these two clean images for all the mentioned settings (top $x\%$ and ϵ), both with and without additional Pol guidance. The values are averaged for these two attempts.

When ϵ is increased, the performance of EA increases for all the top $x\%$ values. The best performance, in terms of the number of generations, of the EA with Pol is obtained when the top 35% of relevant pixels are used with $\epsilon = 16$. It results in a 67.2% speed increase compared to the EA without Pol guidance. For $\epsilon = 16$, Figure 4 shows how EA converges to the target category without Pol on the one hand, and with Pol using top 35% of the most relevant pixels for the (*acorn1*-rhinoceros beetle) ancestor-target pair on the other hand. EA's learning period is drastically shortened when one uses Pol. Indeed, using Pol, the EA finds the path to the target category almost 60% faster than without Pol. This acceleration behavior is consistent across most of the ancestor-target pairs.

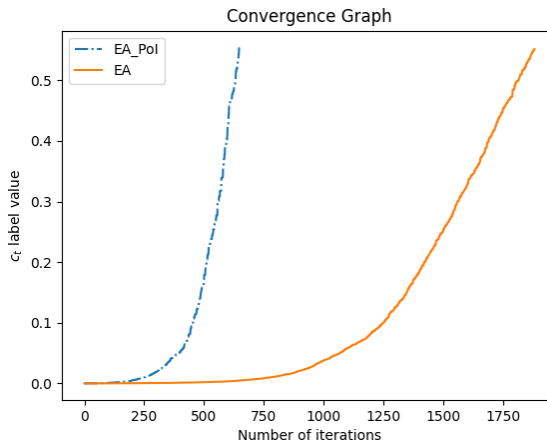


FIGURE 4. With $\epsilon = 16$, EA's convergence pattern from the clean category c_g towards the target category c_t without Pol (EA) and with Pol (EA_Pol, using the top 35% most relevant pixels) is analyzed for $c_g = \text{acorn1}$, $c_t = \text{rhinoceros beetle}$.

Visual quality in the LR domain (Subsection 4.2)

Figure 5 illustrates, with the clean image *acorn1*, the visual quality of low-resolution adversarial images generated by the EA alone (without Pol), and when the EA is guided with Pol using the top 35% of relevant pixels for $\epsilon = 8, 12, 16$. Results for other top x% are provided in Figure 2 of the Additional material. For a human, all obtained adversarial images are challenging to distinguish from the clean image.

Pol+NBU strategy in the HR domain (Subsection 4.3)

In view of what precedes (in terms of speed and visual quality of adversarial images in the LR domain), we used $\epsilon = 16$ and the top 35% most significant pixels identified by BagNet-33 for the remaining experiments combining Pol and NBU.

Using these parameters, the EA generated 56 0.55-strong adversarial images in the LR domain from 100 clean images. Out of the 56, NBU successfully converted 44 of them into HR adversarial images that MobileNet classifies in the target category for the (c_g, c_t) pair and target scenario specified in Table 1. Table 4 summarizes the results for these 44 HR adversarial images; numerical values are averaged. Its first column lists the clean image categories. Note that the *brown_bear* is not included because no 0.55-strong adversarial images were generated from this category. The second column shows the proportion of the image space that is identified by considering the top 35% most relevant pixels. It shows that the EA attack will focus on 70.4% of the clean LR image on average. The third column shows the average number of generations required by the EA to create a 0.55-strong adversarial image in the LR domain (on average, each generation takes between 0.90 and 0.99 seconds). The fourth column gives the average value of τ_t (which is necessarily ≥ 0.55). The fifth column provides the average ct -label value τ_t for degraded adversarial images, and the sixth column gives the resulting average loss $L_c() = \tau_t - \tau_g$, where τ_g is the clean HR image classified in the original category c_g .

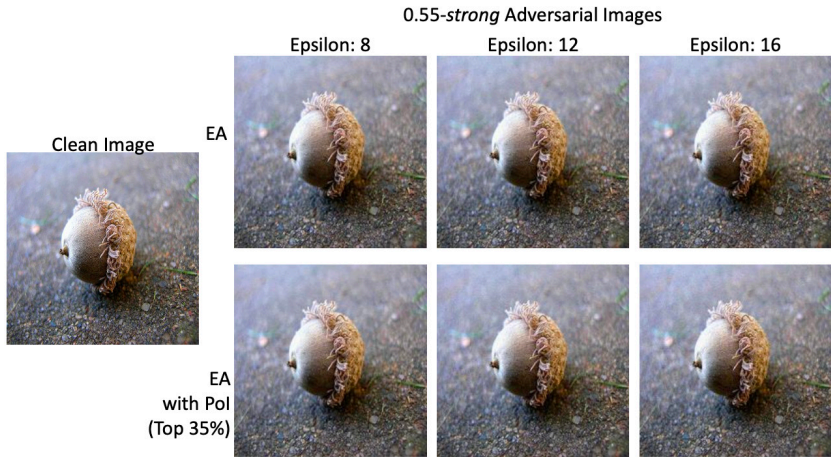


FIGURE 5. Visual quality of the low-resolution adversarial images generated with EA alone and with Pol guidance (using the top 35% of the most relevant pixels) in the LR domain for epsilon values 8, 12, and 16.

On average, the NBU process caused a 0.251 label value loss. Despite this loss, the created HR adversarial images remain adversarial, achieving an average c_t -label value of 0.301.

Table 5 provides the execution time (in seconds) of the main steps of the combined Pol+NBU strategy performed on two representative examples: the largest clean image *canoe4* (2448 x 3264) and the smallest one *llama4* (253 x 380). Using BagNet-33 to find the top 35% most relevant pixels of c_o -label and c_t -label values (combined without any duplication) takes 4.38 seconds. The following step is the attack performed in the LR domain. Its timing varies from one method to another. The EA attack required 23 minutes for one image and 84 minutes for the other. The NBU process blowing up the adversarial noise from the LR domain to the HR domain and adding it to the clean HR image is the last step. It takes less than a second.

Altogether, the Pol+NBU strategy *per se* takes only around 5 seconds and remains completely marginal as compared to the time required by the attack (the EA attack in the present feasibility study). This outcome demonstrates the efficiency of the Pol+NBU approach in generating high-resolution adversarial images with minimal time overhead, apart from the chosen attack method (less than 1% overhead in the case of the EA attack).

TABLE 4. Average metrics (for top 35% and $\epsilon=16$) for generating 0.55-strong adversarial images in the LR domain, including pixels of interest size (avgPol), number of generations (avgGens), target label value before (avg_t) and after NBU (avg_τ), and loss (avg_L).

c_a	avgPol	avgGens	avg_t	avg_τ	avg_L
abacus	75%	3774	0.551	0.249	0.302
acorn	69%	1521	0.554	0.316	0.238
baseball	66%	1146	0.554	0.327	0.227
broom	76%	2153	0.550	0.437	0.113
canoe	73%	2383	0.552	0.268	0.284
hippopotamus	69%	4987	0.551	0.304	0.247
llama	67%	3438	0.553	0.236	0.317
maraca	70%	2069	0.552	0.344	0.208
mountain bike	69%	4252	0.553	0.228	0.325
Average	70.4%	2858	0.552	0.301	0.251

TABLE 5. Time performance of Pol+NBU using the largest and smallest clean images. One uses $\epsilon = 16$, the top 35% most relevant pixels identified by BagNet- 33, and the EA-based attack. Values are in seconds.

HR-Clean Images		Pol	Adversarial Images in the LR domain	NBU	Pol+NBU	Adversarial Images in the HR domain
canoe4	(2448x3264)	4.38	1426	0.74	5.12	1431
llama4	(253x380)	4.37	5071	0.10	4.47	5075

The visual quality of the high-resolution adversarial images (Subsection 4.4)

The visual quality of high-resolution adversarial images generated by the Pol+ NBU strategy for the EA-based attack is assessed on three examples in Figure 6. Its 1st row displays the HR clean images, and its 2nd row their corresponding HR adversarial images. Their names and sizes are at the top of each figure. Despite the added adversarial perturbations, the visual differences between the clean and adversarial HR images are imperceptible to the human eye. To further substantiate this observation, we computed the Fréchet Inception Distance (FID) [35] between clean and adversarial HR images and obtained an average FID score of 54.5.



FIGURE 6. Visual comparison between HR clean (1st row) and adversarial (2nd row) images.

CONCLUSION

This paper introduces Pol+NBU, a generic approach that combines the Pixels of Interest (PoI) and Noise Blowing Up (NBU) strategies. The Pol+NBU strategy is designed to enhance the effectiveness of any adversarial attacks, black-box or white-box, against any convolutional neural network for any scenario (targeted or untargeted). The approach is assessed by a feasibility study performed with a black-box evolutionary-based attack on MobileNet for the targeted scenario.

Experiments were performed for different ϵ (measuring the magnitude of values that a pixel value is allowed to be modified), and top x% values (assessing the most significant pixels for the CNN's classification, as assessed by BagNet- 33). Our study showed that $\epsilon = 16$ and $x = 35$ provides a convenient trade-off. With these choices of parameters, the Pol+NBU method created 44 HR adversarial images with the EA-based attack. The visual quality of the adversarial images is outstanding. A human is unable to distinguish the clean HR image from the adversarial one. The overhead of the Pol+NBU strategy is marginal both in absolute and in comparative terms. In absolute terms, its time cost is 5 seconds. It represents less than 1% overhead as compared to the EA-based attack. Future work will focus on testing Pol+NBU with super high-resolution images and exploring its applicability to other adversarial attacks.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Enea Mancellari developed the methodology, performed the coding, experiments, testing, and wrote the original draft. Ali Osman Topal contributed to the conceptualization, supported the methodology, and participated in writing and reviewing. Franck Leprévost supervised the work, contributed significantly to the conceptualization and methodology, and was involved in reviewing and editing the manuscript.

CONFLICT OF INTEREST

All authors declare that they have no conflicts of interest.

REFERENCES

- [1] Koçi, J, Topal, A. O., & Ali, M. (2020). Threat object detection in X-ray images using SSD, R-FCN and Faster R-CNN. *2020 International Conference on Computing, Networking, Telecommunications & Engineering Sciences Applications (CoNTESA)*, 10-15. <https://doi.org/10.1109/CoNTESA50436.2020.9302863>
- [2] Ghosh, A., Jana, N. D., Das, S., & Mallipeddi, R. (2023). Two-phase evolutionary convolutional neural network architecture search for medical image classification. *Journal Articles*. <https://10.1109/ACCESS.2023.3323705>
- [3] Khan, M. J., Singh, P. P., Pradhan, B., Alamri, A., & Lee, C.-W. (2023). Extraction of roads using the archimedes tuning process with the quantum dilated convolutional neural network. *Sensors*, 23(21), 8783. <https://doi.org/10.3390/s23218783>
- [4] Deng, J., Dong, W., Socher, R., Li, L.-J., Li, K., & Li, F.-F. (2009). ImageNet: A large-scale hierarchical image database. *2009 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 248-255. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2009.5206848>
- [5] Meng, W., Xing, X., Sheth, A., Weinsberg, U., & Lee, W. (2014). Your online interests: Pwned! A pollution attack against targeted advertising. *Proceedings of the 2014 ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security*, 129-140. <https://doi.org/10.1145/2660267.2687258>
- [6] Hardt, M., & Nath, S. (2012) Privacy-aware personalization for mobile advertising. *Proceedings of the 2012 ACM conference on Computer and communications security*, 662-673. <https://doi.org/10.1145/2382196.2382266>
- [7] Leprévost, F., Topal, A. O., & Mancellari, E. (2023). Creating high-resolution adversarial images against convolutional neural networks with the noise blowing-up method. In N. T. Nguyen et al. *Intelligent Information and Database Systems. ACIIDS 2023 (Lecture Notes in Computer Science, Vol. 13995)*. https://doi.org/10.1007/978-981-99-5834-4_10
- [8] Topal, A. O., Mancellari, E., Leprévost, F., Avdusinovic, E., & Gillet, T. (2024). The noise blowing-up strategy creates high-quality, high-resolution adversarial images against convolutional neural networks. *Applied Sciences*, 14(8). <https://doi.org/10.3390/app14083493>
- [9] Leprévost, F., Topal, A. O., Mancellari, E., & Lavanganananda, K. (2023). Zone-of interest strategy for the creation of high-resolution adversarial images against convolutional neural networks. *2023 15th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE)*, 127-132. <https://doi.org/10.1109/ICITEE59582.2023.10317668>
- [10] Topal, A. O., Chitic, R., & Leprévost, F. (2023). One evolutionary algorithm deceives humans and ten convolutional neural networks trained on ImageNet at image recognition. *Applied Soft Computing*, 143. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2023.110397>
- [11] Howard, A. G., Zhu, M., Chen, B., Kalenichenko, D., Wang, W., Weyand, T., Andreetto, M., & Adam, H. (2017). MobileNets: Efficient convolutional neural networks for mobile vision applications. *arXiv preprint arXiv:1704.04861*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1704.04861>
- [12] Varrette, S., Bouvry, P., Cartiaux, H., & Georgatos, F. (2014). Management of an academic HPC cluster: The UL experience. *2014 International Conference on High Performance Computing & Simulation*, 959-967. <https://doi.org/10.1109/HPCSim.2014.6903792>
- [13] Biggio, B., Corona, I., Maiorca, D., Nelson, B., Šrdić, N., Laskov, P., Giacinto, G., & Roli, F. (2013). Evasion attacks against machine learning at test time. *Machine Learning and Knowledge Discovery in Databases*, 387-402. https://doi.org/10.1007/978-3-642-40994-3_25
- [14] Carlini, N., & Wagner, D. (2017). Towards evaluating the robustness of neural networks. *2017 IEEE Symposium on Security and Privacy*, 39-57. <https://doi.org/10.1109/SP.2017.49>
- [15] Szegedy, C., Zaremba, W., Sutskever, I., Bruna, J., Erhan, D., Goodfellow, I., Fergus, R. (2013). Intriguing properties of neural networks. *arXiv:1312.6199v4*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1312.6199>
- [16] Papernot, N., McDaniel, P., Jha, S., Fredrikson, M., Celik, Z. B., & Swami, A. (2016). The Limitations of Deep Learning in Adversarial Settings. *2016 IEEE European Symposium on Security and Privacy*, 372-387. <https://doi.org/10.1109/EuroSP.2016.36>

- [17] Chitic, R., Bernard, N., Leprévost, F. (2020). A proof of concept to deceive humans and machines at image classification with evolutionary algorithms. *Intelligent Information and Database Systems*, 467-480. https://doi.org/10.1007/978-3-030-42058-1_39
- [18] Chitic, R., Leprévost, F., Bernard, N. (2020). Evolutionary algorithms deceive humans and machines at image classification: An extended proof of concept on two scenarios. *Journal of Information and Telecommunication*, 5(1), 1-23. <https://doi.org/10.1080/24751839.2020.1829388>
- [19] Brendel, W., & Bethge, M. (2019). Approximating CNNs with bag-of-local-features models works surprisingly well on ImageNet. *International Conference on Learning Representations*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1904.00760>
- [20] Ester, M., Kriegel, H.-P., Sander, J. & Xu, X. (1996). A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise. *Proceedings of the Second International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, 226-231. <https://dl.acm.org/doi/10.5555/3001460.3001507>
- [21] Su, J., Vargas, D. V., & Sakurai, K. (2019). One pixel attack for fooling deep neural networks. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 23(5), 828-841. <https://doi.org/10.1109/TEVC.2019.2890858>
- [22] Li, Y., Pan, Q., Feng, Z., & Cambria, E. (2023). Few pixels attacks with generative model. *Pattern Recognition*, 144, 109849. <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2023.109849>
- [23] Goodfellow, I. J., Shlens, J., & Szegedy, C. (2015). Explaining and harnessing adversarial examples. *arXiv:1412.6572*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1412.6572>
- [24] Madry, A., Makelov, A., Schmidt, L., Tsipras, D., & Vladu, A. (2019). Towards deep learning models resistant to adversarial attacks. *arXiv:1706.06083*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1706.06083>
- [25] Kurakin, A., Goodfellow, I., & Bengio, S. (2016). Adversarial examples in the physical world. *arXiv:1607.02533*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1607.02533>
- [26] Guo, C., Gardner, J. R., You, Y., Wilson, A. G., & Weinberger, K. Q. (2019). Simple black-box adversarial attacks. *Proceedings of the 36th International Conference on Machine Learning*, 4410-4423. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1905.07121>
- [27] Targonski, C. (2019). TensorFlow implementation of generating adversarial examples with adversarial networks. GitHub. <https://github.com/ctargon/AdvGAN-tf>
- [28] Chitic, R., Topal, A. O., & Leprévost, F. (2023). ShuffleDetect: Detecting adversarial images against convolutional neural networks. *Applied Sciences*, 13(6). <https://doi.org/10.3390/app13064068>
- [29] Rybczak, M., & Kozakiewicz, K. (2024). Deep machine learning of MobileNet, efficient, and inception models. *Algorithms*, 17(3), 96. <https://doi.org/10.3390/a17030096>
- [30] Suharto, E., Suhartono, Widodo, A. P., & Sarwoko, E. A. (2020). The use of MobileNet v1 for identifying various types of freshwater fish. *Journal of Physics: Conference Series*, 1524. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1524/1/012105>
- [31] Elhassouny, A., & Smarandache, F. (2019). Smart mobile application to recognize tomato leaf diseases using Convolutional Neural Networks. *2019 International Conference of Computer Science and Renewable Energies*, 1-4. https://www.researchgate.net/publication/343863345_Smart_mobile_application_to_recognize_tomato_leaf_diseases_using_Convolutional_Neural_Networks
- [32] Wibowo, A., Adhi Hartanto, C., & Wisnu Wirawan, P. (2020). Android skin cancer detection and classification based on MobileNet v2 model. *International Journal of Advances in Intelligent Informatics*, 6(2), 135-148. <https://doi.org/10.26555/ijain.v6i2.492>
- [33] Szegedy, C., Liu, W., Jia, Y., Sermanet, P., Reed, S., Anguelov, D., Erhan, D., Vanhoucke, V., & Rabinovich, A. (2015). Going deeper with convolutions. *2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 1-9. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2015.7298594>
- [34] Simonyan, K., & Zisserman, A. (2014) Very deep convolutional networks for large-scale image recognition. *arXiv:1409.1556*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1409.1556>
- [35] Heusel, M., Ramsauer, H., Unterthiner, T., Nessler, B., & Hochreiter, S. (2017). GANs trained by a two time-scale update rule converge to a local nash equilibrium. *Advances in neural information processing systems*, 30, 6626-6637. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1706.08500>

The contribution of mutation induction to crop improvement: Addressing climate change and ensuring food security

Raymond Joseph^{1*}, Viviane Kopp da Luz¹, Amanda Valentini Baseggio¹, Adriana Pires Soares Bresolin², Antonio Costa De Oliveira¹

¹Federal University of Pelotas (UFPEL), Eliseu Maciel School of Agronomy, Plant Genomics and Breeding Center, Pelotas, Rio Grande do Sul, Brazil

²Federal University of Pampa (UNIPAMPA), Department of Genetics, Biotechnology, and Plant Breeding, Itaqui Campus, Rio Grande do Sul, Brazil

*Autor para correspondencia/Corresponding author, email: raymondjoseph509@gmail.com

La contribución de la inducción de mutaciones a la mejora de cultivos: abordando el cambio climático y garantizando la seguridad alimentaria

Resumen

Para la mejora genética de especies de importancia agrícola, es esencial contar con una amplia base genética, garantizando una variabilidad suficiente para aumentar las oportunidades de selección de rasgos específicos de interés en el campo. Además, el uso de técnicas complementarias a los sistemas de mejoramiento convencional es crucial para explorar eficazmente la variabilidad genética disponible. Actualmente, existen diversas técnicas, como el cultivo in vitro, la transformación genética, la edición génica, la selección asistida por marcadores y la inducción de mutaciones, entre otras. Esta revisión tiene como objetivo sintetizar el desarrollo histórico, las aplicaciones actuales y el potencial futuro de la inducción de mutaciones en la mejora de cultivos, con énfasis en su papel en la adaptación al cambio climático y la seguridad alimentaria. Las técnicas de inducción de mutaciones han desempeñado un papel clave en la respuesta a los desafíos relacionados con la seguridad alimentaria al promover el desarrollo de nuevas variedades para el sector agrícola en diversos países. A través del análisis de la base de datos de variedades mutantes de la FAO/OIEA, fue posible identificar cómo la inducción de mutaciones ha contribuido al desarrollo de cultivares adaptados a las necesidades específicas de seguridad alimentaria y clima. El programa FAO/OIEA (<https://nucleus.iaea.org>), que promueve el uso de técnicas nucleares en la agricultura, ha dado lugar a la liberación de más de 3404 variedades mutantes en 233 especies cultivadas en 75 países. En varios países, como se indica en la MVD, el uso de germoplasma mutante en los programas de mejoramiento vegetal ha sido crucial para la adaptación de los cultivos a nuevas condiciones climáticas, además de satisfacer la creciente demanda de alimentos. Estos avances destacan el potencial de la inducción de mutaciones como una herramienta esencial para abordar los desafíos agrícolas futuros, subrayando la importancia de continuar invirtiendo en técnicas nucleares para el mejoramiento de cultivares adaptados al cambio climático y la seguridad alimentaria global.

Palabras clave: mejoramiento vegetal, variabilidad genética, FAO



Licencia Creative Commons
Atribución-NoComercial 4.0



Editado por /
Edited by:
Sebastián Ponce

Recibido /
Received:
17/12/2024

Aceptado /
Accepted:
02/04/2025

Publicado en línea /
Published online:
16/12/2025



Abstract

For the genetic improvement of species of agricultural importance, it is essential to have a broad genetic base, ensuring sufficient variability to increase opportunities for selecting specific traits of interest in the field. Additionally, the use of techniques complementary to conventional breeding systems is crucial for effectively exploring the available genetic variability. Currently, there are several techniques, such as *in vitro* culture, genetic transformation, gene editing, marker-assisted selection, and mutation induction, among others. This review aims to synthesize the historical development, current applications, and future potential of mutation induction in crop improvement, with an emphasis on its role in adaptation to climate change and food security. Mutation induction techniques have played a key role in addressing challenges related to food security by promoting the development of new varieties for the agricultural sector in various countries. Through the analysis of the FAO/IAEA Mutant Varieties Database, it was possible to identify how mutation induction has contributed to the development of cultivars adapted to the specific needs of food security and climate. The FAO/IAEA program (<https://nucleus.iaea.org>), which promotes the use of nuclear techniques in agriculture, has resulted in the release of more than 3404 mutant varieties in 233 cultivated species in 75 countries. In several countries, as indicated in the MVD, the use of mutant germplasm in plant breeding programs has been crucial for adapting crops to new climatic conditions, in addition to meeting the growing demand for food. These advances highlight the potential of mutation induction as an essential tool to address future agricultural challenges, underlining the importance of continuing to invest in nuclear techniques for breeding cultivars adapted to climate change and global food security.

Keywords: plant breeding, genetic variability, FAO

INTRODUCTION

Plant breeding through mutation induction is considered a valuable advancement in agriculture, playing a crucial role in addressing global food security challenges [1,2]. It is particularly useful in crop breeding programs aimed at introducing one or two traits with limited variability within a given germplasm. This approach has primarily focused on increasing yields to meet current and future challenges, especially by enhancing crop tolerance to environmental stresses and promoting opportunities for sustainable, climate-smart agriculture [3,4].

Climate change is globally recognized as an urgent and real challenge. Nuclear techniques in plant breeding through mutation induction play a crucial role in adapting plants to climate change [4,5]. With global warming and the increased frequency of extreme weather events, developing plant varieties resistant to biotic and abiotic stresses becomes essential. These techniques contribute to enhancing the resistance of agricultural species to adverse climatic conditions, such as high temperatures, droughts, pests, and diseases [6,7,8].

Mutation induction is not a recent topic; it has been studied for nearly a century, and the first commercial crop obtained through the use of mutagenic agents dates back



to 1930 [9]. In Indonesia, around 1936, a tobacco (*Nicotiana tabacum*) mutant was developed, producing a light-colored leaf of high quality and yield [10]. Since the 1970s, various methodologies for induced mutations using gamma rays have been developed with the goal of modifying plant material, thereby expanding the genetic variability of cultivated species and developing varieties with desirable agronomic traits, such as earliness, resistance to biotic stresses, higher yield potential, and improved quality [10,11].

This approach also aims to enhance crop performance stability under adverse environmental conditions, including rising temperatures, frequent droughts, and soil salinization [12]. Furthermore, in crop improvement, the combination of induced mutations with modern genomic and bioinformatics tools enables the establishment of genetic associations that facilitate both marker-assisted breeding and gene editing (Table 1).

TABLE 1. Historical methods for inducing mutations

1901-1904	Mutation through induced radiation in plants/animals [13].
1907	Cramer publishes extensive examples of spontaneous mutants in cultivated plants [14].
1927	<i>Drosophila</i> : proof of X-ray-induced mutation [15].
1928	First report on induced mutation in cultivated plants: barley, corn, wheat, and oats. [16,46].
1936	The first induced mutant variety of tobacco (<i>Nicotiana tabacum</i>), the 'Chlorina' variety, was developed using X-rays.
1942	The first report of induced disease resistance in a cultivated plant: X-ray-induced resistance to mildew in barley [17,18].
1944	The concept of 'Mutagenesis Breeding' was coined; the first report of chemically induced mutation [19].
1949	The first experiments on mutation in cultivated plants using gamma rays from ⁶⁰ Co; ⁶⁰ Co became a standard technique for mutation induction [20].
1954	The first release of a mutant variety in a vegetatively propagated crop: the tulip variety 'Faraday,' with improvements in flower color and pattern [21].
1964	The Joint FAO/IAEA Division was created with the mandate to support and promote induced mutation technologies in agricultural production, particularly addressing food security issues in developing countries [12,47].
1966	The first chemically induced mutant variety, Luther barley, was released in the USA [22].
1993	The FAO/IAEA Mutant Variety Database (//mvgs.iaea.org) was established in 2008 as the registry for mutant varieties of plants [12].
2000-2009	Development of high-throughput genotyping and phenotyping using automated, robotic, and computerized systems [23].
2000	Development of TILLING (Targeting Induced Local Lesions in Genomes) populations [24].
2012	The first case of genome editing in rice, known as the <i>rice mutant</i> .

The Joint FAO/IAEA Centre of Nuclear Techniques in Food and Agriculture provides data on officially released induced mutant materials for both seed-propagated and vegetatively propagated plants. The database, which records mutant varieties released worldwide across more than a hundred different crop species, highlights the contribution



of mutation induction to global food security and crop adaptation to climate variations. For each variety, the database includes information on the type of mutagen used, the dose applied, the improved characteristics, and the available agronomic data for varieties released in different countries worldwide.

By the end of March 2025, the International Atomic Energy Agency (IAEA) reported that, through the use of induced mutation techniques in economically important cultivars, a total of 3404 mutant cultivars had been obtained across 233 crop species in more than 75 countries worldwide. Mutant varieties were developed in 16 African, 27 European, five Latin American, five North American and the Caribbean, and 21 Asian countries. Notably, over 50% of these mutants were developed using gamma rays (Fig. 1). These mutant varieties were bred for a variety of traits, including tolerance to abiotic stresses (246 mutants), resistance to biotic stresses (547), increased yield and yield components (1019), industrial and nutritional quality traits (2314), and agronomic and botanical characteristics (2420). Most of the released mutant varieties consist primarily of cereals, accounting for over 47%. Rice ranks first, representing more than 54.41% of these varieties (Fig. 2). The remaining categories include roots and tubers (0.62%), fibers (2.38%), vegetables (2.97%), forages (2.38%), fruits (2.94%), flowers/ornamentals (21.47%), legumes and pulses (13.75%), and medicinal plants (0.62%) (Fig. 2). The majority of mutant varieties were released in Asia (2089), followed by Europe (960), North America (211), Africa (82), Latin America (53), and Australia/Pacific (9) (Fig. 3).

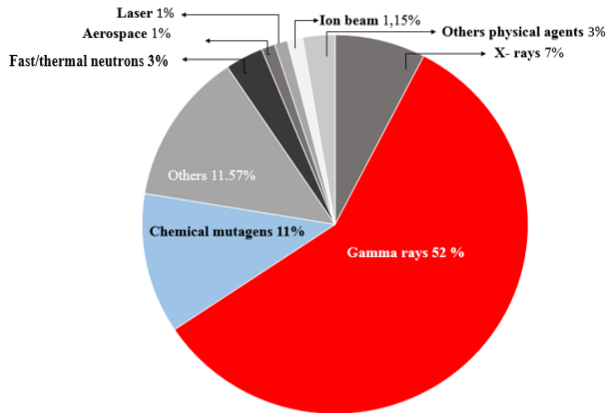


FIGURE 1: Distribution of mutagen types used in mutation induction (March 2025, FAO/IAEA MVD)

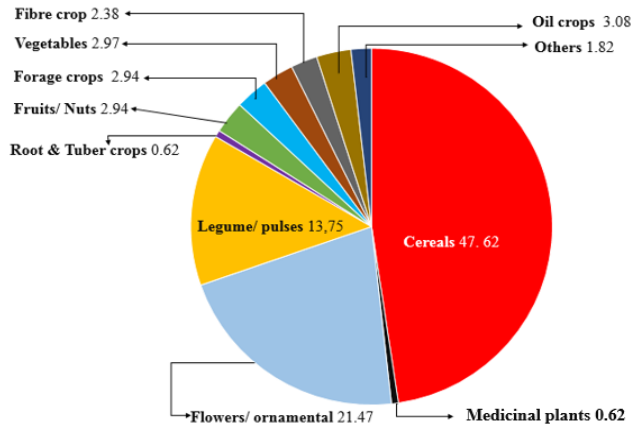


FIGURE 2: Proportion of plant varieties derived from induced mutations. Source: Mutant Variety Database and Genetic Stock Center, <https://nucleus.iaea.org/>, March 2025

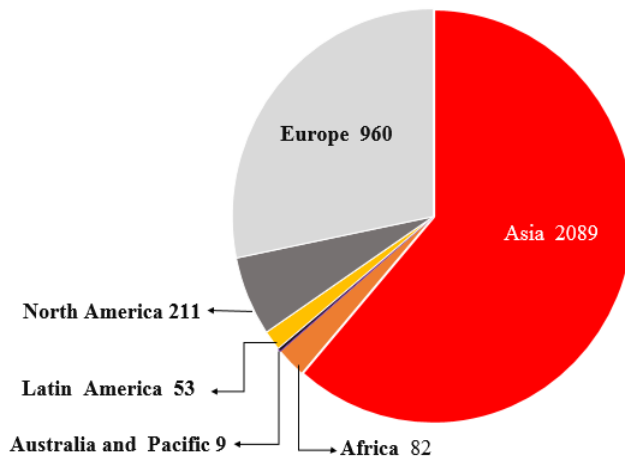


FIGURE 3: Number of registered mutant varieties per continent (March 2025, FAO/IAEA MVD)

Plant breeding is based on the observation and selection of the best individuals, aiming to identify and fix genes of interest that confer tolerance to abiotic stresses and resistance to biotic stresses within a population. In this context, the use of mutation induction techniques in genetic improvement programs is an effective strategy for generating genetic variability and enhancing population adaptation to adverse environmental conditions. This review aims to synthesize the historical development, current applications, and future potential of mutation induction in crop improvement, with an emphasis on its role in climate change adaptation and global food security.



ROLE OF INDUCED MUTATIONS IN ENHANCING GLOBAL FOOD SECURITY

Asia

According to the FAO/IAEA database, over 61% of mutants have been released in Asia. Specifically, regarding rice, 35.42% of the mutants were released in Asia. China, Japan, and India are the three countries responsible for releasing the largest number of mutants worldwide, with the goal of increasing genetic variability and promoting food security.

In China, mutation induction strategies have played a significant role in plant breeding for over 60 years. China has officially released 825 mutant cultivars, encompassing 47 agricultural and ornamental species, covering an annual area of nine million hectares. This production increase amounts to over 1.5 million tons annually, with an estimated value of USD 500 million [25]. To date, the FAO/IAEA database has recorded a total of 296 mutant rice varieties, which have been released with superior characteristics such as semi-dwarf stature, early maturity, high yield, disease resistance/tolerance, improved grain quality, and other agronomic traits.

In India, the world's first mutant variety of cotton (*Gossypium sp.*) was released in 1948. Named 'M.A.9', it was induced through X-rays and developed with tolerance to water stress [6,26,48].

The technique of mutation induction in plants has significantly contributed to India's food self-sufficiency and economic growth, particularly in the production of rice, peanuts, chickpeas, beans, cotton, barley, castor, and flowers/ornamentals. As of early 2024, India has approved and/or released a total of 346 mutant cultivars belonging to over 57 plant species [12]. This includes the first induced mutant variety of peanuts, 'TG 1', developed using X-ray irradiation (750 Gy) in 1973. The main improved attributes of the mutant variety include increased seed size, maturity in 135 days, high oil content (47- 48%), and resistance to Tobacco Mosaic Virus (TMV). Following this success, 15 other Trombay (TG) peanut varieties were developed, characterized by large seeds, early maturity, and high yield.

In Japan, genetic improvement through mutation induction began in the 1960s. Techniques employed included primarily X-rays, gamma rays, ion beams, chemical agents, and in vitro culture (somaclonal variation) [5]. As a result, over 500 mutant varieties have been released, spanning more than 79 cultivar species, with approximately 46% of these being rice cultivars, according to the IAEA database [12]. The first rice cultivar was registered in 1966.

Europe

In Europe, the introduction of mutation induction techniques has played a significant role in plant breeding programs, especially for barley, wheat, maize, soybean, tobacco, ornamental species, and vegetable cultivars. This effort has resulted in the release of 960 mutant varieties across different countries [12,27,28]. Among European countries, the Russian Federation, Netherlands, and Germany stand out for employing mutation induction methods extensively, being responsible for over 58% of the released varieties.



In the Russian Federation, induced mutation began in the 1960s. Mutation induction has led to the release of 216 mutant varieties across more than 35 crop species [12]. The first mutant developed using gamma irradiation was 'Universal I' (*Glycine max* L.), officially approved in 1965. This variety was developed specifically for high yield (exceeding the initial variety by 500 kg/ha in grain yield), resistance to lodging, and suitability for both grain production and green fodder [29].

In Germany, mutation induction in barley cultivation (*Hordeum vulgare* L.) has been notably successful. A total of 66 mutant barley cultivars have been approved and/or released, including the cultivar 'Nadja', officially approved in 1975, and the mutant variety 'Trumpf'. These varieties were developed through hybridization with the mutant 'Diamant', obtained by irradiating seeds with X-rays (100 Gy). The main improved attributes of the mutant variety include short stature, lodging resistance, resistance to mildew, stripe rust, leaf rust, superior brewing quality, high malt quality, and high yield, surpassing that of 'Diamant'. Over 33% of the barley cultivation area has been occupied by this mutant variety [30]. The 'Trumpf' mutant has become incorporated into many barley cultivar breeding programs across numerous countries worldwide [21].

Africa

The African continent is known as the center of origin for several economically important cereals such as sorghum, millet, and African rice (*Oryza glaberrima* Steud). Mutation induction has also been successfully applied in Egypt, resulting in the introduction of two mutant varieties of dwarf stature ('semi-dwarf')—'Giza 176' (1989) and 'Sakha 101' (1997)—yielding 3.8 t ha⁻¹ and 8.9 t ha⁻¹, respectively [31,32].

In the 1990s, five high-yielding varieties of sesame were released/introduced. Another significant economic success was the development of two mutant varieties of safflower (*Carthamus tinctorius* L.), which were released in 2011. These varieties exhibited high yields and resistance to diseases such as leaf spot and rust, contributing to increased income for growers in the country. The variety 'Inhas 10' was cultivated through pedigree selection and crossing between the best mutants and the local variety 'Giza 1'. An area of 10,000 hectares was planted with this sesame variety, with its commercial value estimated at around 2,996 Egyptian pounds per Fadden.

In Sudan, mutation induction methods were initiated around 25 years ago across various cultivars with the aim of increasing the productivity of several crops, including cotton, banana, tomato, sugarcane, sesame, peanuts, and cereals. These efforts were undertaken under different environmental conditions to ensure sustainable food security. The development of the mutant banana cultivar 'Albeely' was significant, showing a yield increase of over 30% and high fruit quality. It was officially approved in 2007 [33,12]. Another mutant, 'Tafra-1', incorporated into the rainfed peanut breeding program, was released in 2018 for Sudanese farmers in water-stressed areas. This innovation improved their livelihoods and contributed to an increase in the country's economy and exports [34].

In the 1990s, Ghana began applying induced mutation breeding methods, leading to the development of the mutant variety of cassava (*Manihot esculenta* L. Crantz) called 'Tekbankye'. This variety exhibited resistance to African Cassava Mosaic Virus (ACMV), high



dry matter content (40%), good cooking quality, and vigorous growth. It was developed through irradiation with gamma rays (25Gy) and was officially approved in 1997 [35,12].

North America

In North America, a total of 211 mutant varieties have been developed. According to the FAO/IAEA database (2025), over 65% of these mutants were developed in the United States, including the first semi-dwarf rice variety *Calrose 76*, which was officially approved in 1977 in California. It was developed through seed irradiation with gamma rays (250 Gy). The primary improved attribute of this mutant variety was its reduced height (95 cm) compared to the original *Calrose* cultivar, which had a height of 120 cm.

The discovery of the *Sd1* gene responsible for semi-dwarf stature in rice led to its transfer through crosses with other varieties, resulting in the development of 25 new semi-dwarf rice cultivars. Thirteen were developed in California, ten in Australia, and two in Egypt [36]. The United States is one of the leading countries in utilizing mutation induction techniques, achieving notable successes [26]. Canada and Mexico also stand out for their extensive registration of mutant varieties, emphasizing agricultural economics and ensuring food security.

Latin America

In Argentina, mutation induction has a long-standing tradition in crop improvement, primarily conducted at the “Ewald A. Favret” Institute of Genetics. Both chemical and physical mutagenesis have been pivotal in enhancing crop productivity [37,38]. A notable example is the mutant peanut variety *Colorado*, developed by irradiating seeds with X-rays (200 Gy). This variety exhibited significant increases in yield, fruit number, resistance to *Cercospora* spp., and oil content. Following its official approval, *Colorado* became a major success, occupying over 20% of the peanut-growing area in Argentina (approximately 30,000 hectares) during the 1970s [7,30].

The mutant variety ‘Puita INTA-CL’ released in 2005, with high yield and herbicide resistance, occupied more than 15% of the rice cultivation area in Argentina. Furthermore, this variety was cultivated in several Latin American countries where weeds and red rice are problematic, such as Brazil, Honduras, Chile, the Dominican Republic, Costa Rica, Uruguay, Colombia, Panama, and Nicaragua. This dissemination significantly contributed to food security in these countries [26].

In Cuba, the application of nuclear methods began in the 1970s, focusing on mutation induction, which achieved numerous successes. This resulted in the development of four tomato cultivars (*Solanum lycopersicum* L.), four sugarcane varieties (*Saccharum* spp.), three soybean varieties (*Glycine max* Merrill), three hibiscus varieties (*Hibiscus* sp.), and nine rice varieties (*Oryza sativa* L.). Notably, the first mutant rice variety ‘GINES’ was released in 2007, developed through in vitro mutagenesis using proton radiation. Another significant rice variety, ‘LP7’, officially launched in 1997, demonstrated high yield and performed well under saline stress conditions [39]. In 2007, Cuba also introduced the first mutant tomato variety ‘Maybel’, which exhibited superior performance in drought conditions. It was introduced and cultivated in rural areas across different provinces of Cuba [40].



In Peru, genetic improvement through mutation began in the 1970s with notable successes using mutagenic agents to develop improved barley varieties, one of the most important cereals in terms of area cultivation in Peru. In 1995, the first mutant barley variety (*Hordeum vulgare*) 'UNA-La Molina 95' was released, developed through seed irradiation with gamma rays (300 Gy). This mutant was characterized by its higher protein content, dwarf stature, and early maturation [12]. In 2006, a second barley variety called 'Centenario' was released and cultivated in the highlands of Peru, up to 5000 meters above sea level, significantly contributing to food security [41]. Mutation induction has also been applied to older crops in the Andean region and native Peruvian crops such as kiwicha (*Amaranthus* sp. L.). This variety, officially approved in 2006, was developed through seed irradiation with gamma rays (400 Gy), demonstrating high yield, improved grain color and size, broad adaptability, and salinity tolerance.

In Brazil, a total of 16 varieties have been obtained through induced mutation, including four varieties of rice, five of beans, four of ornamentals, two of wheat, and one of citrus (Table 2). The first mutant variety of a wheat cultivar (*Triticum aestivum* L.) was successful. In 1974, the mutant variety IAS 63 was officially approved. It was developed through hybridization, combining two mutants generated by gamma radiation (at doses between 100-300 Gy) applied to the seeds. Its distinctive characteristics include a high yield of approximately 19%, resistance to grain shattering, and increased resistance to stem rust [42,12]. Brazil is positioned as the largest producer and consumer of rice outside of Asia. It has four mutant cultivars registered in the International Atomic Energy Agency (IAEA) database (FAO/IAEA). Among these, IRAT 177 stands out, officially approved in 1988. This variety is a spontaneously mutated selection from the variety IRAT 79, obtained through seed irradiation with gamma rays (250-300 Gy). One of the key improved attributes of this mutant cultivar is increased tillering [43]. Another mutant cultivar, SCS114 Andosan, was officially approved in 2005. It was developed through seed irradiation with gamma rays (150 Gy). Its primary improved attributes include increased yield, early maturity, and improved grain quality [44]. The rice cultivar SCS118 Marques, obtained through gamma irradiation from the SCSBRS Tio Taka cultivar, was officially approved in 2013. SCS118 Marques features modern architecture, lodging resistance, a late maturation cycle, moderate resistance to blast disease, high yield potential, long grains, and very high cooking quality [45]. Another mutant cultivar is SCS121 CL, which incorporates second-generation Clearfield technology with resistance to imidazolinone herbicides. This cultivar also features a modern plant type, lodging resistance, a late maturation cycle, high yield potential, long grains, and good cooking quality, and it was officially approved in 2014 [6]. The use of mutant cultivars has immensely contributed to increasing productivity and promoting economic growth worldwide. In Brazil, however, plant improvement through mutation remains relatively insignificant, accounting for only 0.47% of the cultivars released and registered by FAO/IAEA [12].



TABLE 2. Genotypes obtained through induced mutations in Brazil (March 8, 2025, FAO/IAEA MVD)

Variety	Year	Latin name	Common name	Character improvement
IAS 63	1974	<i>Triticum aestivum</i> L.	Wheat	Resistance to grain shading and increased resistance to stem rust
BR4	1979	<i>Triticum aestivum</i> L.	Wheat	High yield and resistance to stem rust
CAP-1070	1986	<i>Phaseolus vulgaris</i> L.	Common bean	Growth habit (bush type) and early maturity
IRAT 177	1988	<i>Oryza sativa</i> L.	Rice	Higher plant height and high tillering
FT-Paulistinha	1992	<i>Phaseolus vulgaris</i> L.	Common bean	Resistance to anthracnose, resistance to leaf spot, altered plant architecture and high yield
IAPAR 57	1992	<i>Phaseolus vulgaris</i> L.	Common bean	Resistance to Golden Mosaic Virus Disease
IAPAR 65	1993	<i>Phaseolus vulgaris</i> L.	Common bean	Resistance to Golden Mosaic Virus Disease
Cristiane	1995	<i>Dendranthema x grandiflora</i>	Chrysanthemum	White flower color
Ingrid	1995	<i>Dendranthema x Grandiflora</i>	Chrysanthemum	Pink flower color
Magali	1996	<i>Chrysanthemum sp.</i>	Chrysanthemum	Brown-colored inflorescence
Repin Rosa	1996	<i>Dendranthema x Grandiflora</i>	Chrysanthemum	Altered flower color
Campeiro	2003	<i>Phaseolus vulgaris</i> L.	Common bean	High yield and good plant architecture
SCS114 Andosan	2005	<i>Oryza sativa</i> L.	Rice	High yield, early maturity and good quality
SCS118 Marques	2013	<i>Oryza sativa</i> L.	Rice	Resistance to lodging, high yield potential and long grains with superior quality
SCS121 CL	2014	<i>Oryza sativa</i> L.	Rice	Resistant to herbicides of the imidazolinone chemical group, lodging resistance, late maturity cycle, high yield potential, long grains, and good cooking quality
IAC 2014	2016	<i>Citrus sinensis</i> L. Osbeck	Sweet orange	Seedless fruits and greater tolerance to citrus canker (in leaves and fruits)

CONCLUSIONS

The FAO-IAEA Joint Division of Nuclear Techniques in Food and Agriculture, established in 1964, has played a key role in advancing research and the application of nuclear techniques to improve food security and sustainable agricultural practices. Mutation induction can be considered a powerful tool in plant genetic improvement, playing an important role in addressing climate change and promoting global food security. In



recent decades, mutagenesis techniques such as gamma radiation, laser irradiation, ion beams, X-rays, and fast/thermal neutrons have enabled the development of cultivars with enhanced agronomic traits, including resistance to abiotic and biotic stresses, increased productivity, and improved nutritional quality. These innovations have been crucial in adapting crops to adverse climatic conditions, which are becoming more frequent due to climate change. With a successful track record in regions such as Asia, Africa, Latin America, and Europe, mutation induction has proven effective in expanding genetic variability and creating more resilient varieties, essential for ensuring food security in a constantly changing world.

The benefits of these technologies are reflected in increased agricultural productivity, resistance to pests and diseases, and improved product quality, resulting in significant economic benefits for developing countries. As new genomic and bioinformatics tools become more accessible, the combination of these technologies with mutation induction promises to further accelerate progress in crop improvement, opening new possibilities for sustainable and resilient agriculture. The role of mutation induction will be crucial in addressing the challenges posed by climate change and ensuring global food security in the coming decades.

CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

ACKNOWLEDGMENTS

We gratefully acknowledge the Coordination for the Improvement of Higher Education Personnel (CAPES) and the Department of Genomics and Plant Breeding at the Federal University of Pelotas (UFPEL) for their support.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Raymond Joseph: Conceptualization, Methodology, Investigation, Writing – original draft, Writing – review and editing.

Viviane Kopp da Luz: contributed to the collection, organization, and interpretation of data from the FAO/IAEA Mutant Varieties Database (MVD) and participated in writing and critically reviewing the manuscript.

Amanda Valentini Baseggio: contributed to the analysis and discussion of mutation induction techniques in plant breeding and their implications for food security and climate change adaptation

Adriana Pires Soares Bresolin: Conceptualization, Methodology, Investigation, Writing – original draft, Writing – review and editing.

Antonio Costa De Oliveira: Project administration, Resources, Validation, Supervision, Writing – review and editing.



DECLARATION OF GENERATIVE AND AI-ASSISTED TECHNOLOGIES IN THE WRITING PROCESS

For the article titled “The Contribution of Mutation Induction to Crop Improvement: Addressing Climate Change and Ensuring Food Security”, the author Raymond Joseph declares that he used ChatGPT (OpenAI) to assist with language refinement, grammar correction, and typographical error correction during the preparation of the manuscript. Afterwards, the author thoroughly reviewed and edited the content as deemed necessary and takes full responsibility for the final version and the published content.

DATA AVAILABILITY STATEMENT

The data supporting the findings of this study are publicly available in the FAO/IAEA Mutant Varieties Database (MVD), maintained by the Food and Agriculture Organization (FAO) and the International Atomic Energy Agency (IAEA), and can be accessed at <https://mvd.iaea.org>. All information regarding mutant cultivars, crop species, and countries of origin was obtained exclusively from this database and has been properly cited in the manuscript. No proprietary or confidential datasets were used in this study.

REFERENCES

- [1] Gustafson, P. (2018). *World Food Supply Improvement: Problems and Prospects* (No. IAEA-CN--263). <https://inis.iaea.org/records/tyzsf-0jd63>
- [2] Ohnoutkova, L. (2019). Mutation breeding in barley: Historical overview. *Barley: Methods and Protocols*, 7-19. <https://doi.org/10.1079/PAVSNNR20116032>
- [3] Joseph, R., Apollon, W., & De Oliveira, A.C. (2025). The stressing point: How plants respond to environmental stimuli. *Biotechnology Advances*, 84, Article 108691. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2025.108691>
- [4] Sarsu, F. (2020). Contribution of induced mutation in crops to global food security. *ACI Avances en Ciencias e Ingenierías*, 12(3), 10-10. <https://doi.org/10.18272/aci.v12i3.2031>
- [5] Nakagawa, H. (2021). History of mutation breeding and molecular research using induced mutations in Japan. In S. Sivasankar, N. Ellis, L. Jankuloski, & I. Ingelbrecht (Eds.), *Mutation breeding, genetic diversity and crop adaptation to climate change* (pp. 24-39). CABI. <https://doi.org/10.1079/9781789249095.0003>
- [6] Kharkwal, M. C. (2023). Role of mutation breeding in crop improvement with special reference to Indian subcontinent. In S. Penna & S. M. Jain (Eds.), *Mutation breeding for sustainable food production and climate resilience* (pp. 355-428). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-16-9720-3_13
- [7] Shu, Q. Y. (2009). Induced plant mutations in the genomics era. *Joint FAO/IAEA Programme, Division of Nuclear Techniques in Food and Agriculture, International Atomic Energy Agency, Vienna (Austria), & Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome (Italy)*. <https://inis.iaea.org/records/zqfdp-mm645>
- [8] Venske, E., Joseph, R., Luz, V., Tejada, L. H. C., Maia, L., Pegoraro, C., & Oliveira, A. (2024). Mutation breeding of rice for drought tolerance in southern Brazil. Chapter 2.2. In *Crop improvement with induced genetic variation to cope with drought in rice and sorghum*. IAEA. <https://doi.org/10.61092/iaea.fngh-4elo>
- [9] Datta, S. K. (2023). *Induced mutation breeding*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-981-19-9489-0>
- [10] Suprasanna, P., Mirajkar, S. J., & Bhagwat, S. G. (2015). Induced mutations and crop improvement. In B. Bahadur, M. Venkat Rajam, L. Sahijram, & K. Krishnamurthy (Eds.), *Plant Biology and Biotechnology*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-81-322-2286-6_23
- [11] Chairez Tejada, L. H., Joseph, R., Venske, E., Kopp da Luz, V., Chacón-Ortiz, A. E., Magalhães Júnior, A. M. de, da Maia, L. C., Oliveira, A. C. de, & Pegoraro, C. (2024). Assessment of mutant rice genotypes on growth cycle length and response to reduced water availability. *Scientia Agricola*, 81, 2-8. <https://doi.org/10.1590/1678-992X-2022-0272>
- [12] FAO/IAEA Mutant Variety Database [Internet]. International Atomic Energy Agency (IAEA): <https://nucleus.iaea.org/sites/mvd/SitePages/Search.aspx>, accesse, 2025.
- [13] Vries, H. de. (1910). *The mutation theory: Experiments and observations on the origin of species in the vegetable kingdom* (Vol. 2). Open Court Publishing Company. <https://www.biodiversitylibrary.org/item/16402>
- [14] Shu, Q. Y., Forster, B. P., & Nakagawa, H. (2012). *Plant mutation breeding and biotechnology*. CABI; FAO. <https://doi.org/10.1079/9781780640853.0000>
- [15] Muller, H. J. (1927). Artificial transmutation of the gene. *Science*, 66(1699), 84-87. <https://doi.org/10.1126/science.66.1699.84>
- [16] Stadler, L. J. (1928). Mutations in barley induced by X-rays and radium. *Science*, 68(1756), 186-187. <https://doi.org/10.1126/science.68.1756.186>
- [17] Freisleben, R., & Lein, A. (1942). Über die Auffindung einer mehltaresistenten Mutante nach Röntgenbestrahlung einer anfälligen reinen Linie von Sommergerste. *Naturwissenschaften*, 30(40), 608-608. <https://doi.org/10.1007/BF01488231>
- [18] Jørgensen, I. H. (1992). Discovery, characterization and exploitation of Mlo powdery mildew resistance in barley. *Euphytica*, 63, 141-152. <https://doi.org/10.1007/BF00023919>
- [19] Auerbach, C., & Robson, J. M. (1946). Chemical production of mutations. *Nature*, 157(3984), 302-302. <https://doi.org/10.1038/157302a0>

- [20] Sparrow, A. H., & Singleton, W. R. (1953). The use of radiocobalt as a source of gamma rays and some effects of chronic irradiation on growing plants. *The American Naturalist*, 87(832), 29-48. <https://doi.org/10.1086/281753>
- [21] Van Harten, A. M. (1998). *Mutation breeding: theory and practical applications* (Vol. 1). Cambridge University Press.
- [22] Ohnoutkova, L. (2019). Mutation breeding in barley: Historical overview. *Barley: Methods and Protocols*, 7-19. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-8944-7_2
- [23] Tester, M., & Langridge, P. (2010). Breeding technologies to increase crop production in a changing world. *Science*, 327(5967), 818-822. <https://doi.org/10.1126/science.118370>
- [24] McCallum, C. M., Comai, L., Greene, E. A., & Henikoff, S. (2000). Targeting Induced Local Lesions IN Genomes (TILLING) for plant functional genomics. *Plant Physiology*, 123(2), 439-442. <https://doi.org/10.1104/pp.123.2.439>
- [25] Liu, L., Xie, Y., Guo, H., Zhao, L., Xiong, H., Gu, J., & Zhao, S. (2021). New mutation techniques for crop improvement in China. In S. Sivasankar, N. Ellis, L. Jankuloski, & I. Ingelbrecht (Eds.), *Mutation breeding, genetic diversity and crop adaptation to climate change*, 47-52. CABI <https://doi.org/10.1079/9781789249095.0005>
- [26] Kharkwal, M. C., & Shu, Q. Y. (2009). The role of induced mutations in world food security. In Q. Y. Shu (Ed.), *Induced plant mutations in the genomics era*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/4/i0956e/i0956e.pdf>
- [27] Sarsu, F. (2020). Contribution of induced mutation in crops to global food security. *ACI Avances en Ciencias e Ingenierías*, 12(3), 10-10. <https://doi.org/10.18272/aci.v12i3.2031>
- [28] Zakir, M. (2018). Mutation breeding and its application in crop improvement under current environmental situations for biotic and abiotic stresses. *International Journal of Research Studies in Agricultural Sciences*, 4(4), 1-10. <https://www.arcjournals.org/pdfs/ijrsas/v4-i4/1.pdf>
- [29] Maluszynski, M. (2001). Officially released mutant varieties – The FAO/IAEA Database. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 65(3), 175-177. <https://doi.org/10.1023/A:1010652523463>
- [30] Micke, A., & Donini, B. (1981, August). Use of induced mutations in improvement of seed propagated crops. In *Induced variability in plant breeding* (pp. 2-9). Centre for Agricultural Publishing and Documentation. <https://edepot.wur.nl/319060>
- [31] Badawi, A. T. (2001). Yield gap and productivity decline in Egypt. *Yield Gap and Productivity Decline in Rice Production*, 429-442.
- [32] Hassan, S. M., Aidy, I. R., Bastawisi, A. O., & Draz, A. E. (1998). Weed management using allelopathic rice varieties in Egypt. *Allelopathy in Rice*, 27-37.
- [33] Tak, H., Bhakta, S., Negi, S., & Ganapathi, T. R. (2023). Induced mutations for genetic improvement of banana. In S. Penna & S. M. Jain (Eds.), *Mutation breeding for sustainable food production and climate resilience* (pp. 719-734). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-16-9720-3_24
- [34] Abdalla, E., Ahmed, T., Bakhit, O., Gamar, Y., Elshaikh, S., Mohammed, Y., & Mardi, A. S. A. H. (2021). Groundnut mutants with end-of-season drought tolerance for the marginal dry lands of North Kordofan State, Sudan. In S. Sivasankar, N. Ellis, L. Jankuloski, & I. Ingelbrecht (Eds.), *Mutation breeding, genetic diversity and crop adaptation to climate change* (pp. 243-257). CABI. <https://doi.org/10.1079/9781789249095.0025>
- [35] Yan, H., Lu, L., Hershey, C., Ceballos, H., Chen, S., & Li, K. (2013). Cassava mutation breeding: Current status and trends. *Plant Mutation Reports*, 3(1), 37-44. <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Newsletters/PMR-3-1.pdf>
- [36] Rutger, J. N., Peterson, M. L., & Hu, C. H. (1977). Registration of Calrose 76 rice 1 (Reg. no. 45). *Crop Science*, 17(6), 978. <https://doi.org/10.2135/cropsci1977.0011183X001700060047x>
- [37] Landau, A., Brizuela, V., Lencina, F., Martínez, A., Tcach, M., Díaz, D. & Prina, A. R. (2020). Induced mutations in crop plants: Mutants of scientific and/or agronomic interest at the Institute of Genetics "Ewald A. Favret". *ACI Avances en Ciencias e Ingenierías*, 12(3). <https://doi.org/10.18272/aci.v12i3.1928>
- [38] Prina, A. R., Landau, A. M., Martínez, A. E., Pacheco, M. G., Arias, M. C., Etchart, V. J. & Díaz, D. G. (2011). Fuentes primarias de variabilidad genética en plantas cultivadas: Mutaciones Inducidas y Genes Mutadores. *Journal of Basic and Applied Genetics*, 22(1), Article 10. <https://www.scielo.org.ar/pdf/bag/v22n1/v22n1a10.pdf>



- [39] Gonzalez, M. C., Mukandama, J. P., Ali, M. M., Trujillo, D., Fuentes, J. L., Altanez, S., & Peteira, B. (2008). *Development of drought tolerant tomato varieties through induced mutation in Cuba* (No. IAEA-CN--167). <https://inis.iaea.org/records/88qaw-vxe48>
- [40] Gonzalez, M. C., Perez, N., Cristo, E., & Ramos, M. (2008). *Salinity tolerant mutant obtained from protons radiations* (No. IAEA-CN--167).
- [41] Gómez-Pando, L., Eguiluz, A., Jimenez, J., Falconí, J., & Aguilar, E. H. (2009). Barley (*Hordeum vulgare*) and kiwicha (*Amaranthus caudatus*) improvement by mutation induction in Peru. In Q. Y. Shu (Ed.), *Induced plant mutations in the genomics era* (pp. 371-374). Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/4/i0956e/i0956e.pdf>
- [42] Konzak, C. F. (1987). Mutations and mutation breeding. *Wheat and Wheat Improvement*, 13, 428-443. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr13.2ed.c24>
- [43] Clement, G., & Poisson, C. (1988). *Genetic determinants of semi-dwarf characters induced in Oryza sativa for upland rice cultivation* (pp. 5-6). IAEA. <https://inis.iaea.org/records/msf1k-2fv58>
- [44] Ishiy, T., Schiocchet, M. S., Bacha, R. E., Alfonso-Morel, D., Tulman Neto, A., & Knoblauch, R. (2006). Rice mutant cultivar SCS114 Andosan. *Plant Mutation Reports*, 1(2), 25. <https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Newsletters/PMR-01-02.pdf>
- [45] Schiocchet, M. A., Noldin, J. A., Raimondi, J. V., Tulmann Neto, A., Marschalek, R., Wickert, E., Neves Martins, G., Hickel, E., Knoblauch, R., Scheuermann, K. K., Eberhardt, D. S., & Andrade, A. D. (2014). SCS118 Marques-New rice cultivar obtained through induced mutation. *Crop Breeding and Applied Biotechnology*, 14, 68-70. <https://doi.org/10.1590/S1984-70332014000100012>
- [46] Stadler, L. J. (1928). Genetic effects of X-rays in maize. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 14(1), 69-75. <https://doi.org/10.1073/pnas.14.1.69>
- [47] Van Harten, A. M., & Broertjes, C. (1989). Induced mutations in vegetatively propagated crops. *Plant Breeding Reviews*, 6, 55-91. <https://doi.org/10.1002/9781118061039>
- [48] Kharkwal, M. C., Pandey, R. N., & Pawar, S. E. (2004). Mutation breeding for crop improvement. In H. K. Jain & M. C. Kharkwal (Eds.), *Plant breeding* (pp. 601-645). Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-007-1040-5_26

Desarrollo de una propuesta de producción de espirulina en polvo aplicando principios de economía circular para la industrialización

Jonathan Sayavedra-Delgado^{1,2*} , Marielisa Bravo Cordero¹ , Estefanía Haro Viteri¹ , José Álvarez-Barreto² 

¹ Departamento de Ingeniería Química, Colegio de Ciencias e Ingenierías, Universidad San Francisco de Quito USFQ, Ingenierías, Quito, Ecuador.

² Departamento de Ciencias de la Vida y la Agricultura Sede Santo Domingo, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Sangolquí, Ecuador.

*Autor de correspondencia/Corresponding author; email: jsayavedra@espe.edu.ec

Development of a proposal for the industrial production of spirulina powder applying circular economy principles

Resumen

Este trabajo presenta un diseño para un proceso de producción de espirulina, con un enfoque en la circularidad. Se propone un fotobiorreactor para su cultivo y se analizó la viabilidad de cultivarla en la localidad de Tumbaco, Pichincha, Ecuador. El proceso se diseñó utilizando un diagrama de bloques, junto con el balance de masa para cuantificar las entradas y salidas involucradas en el cultivo del alga, el procesamiento y el empaque de espirulina en polvo. Además, se realizó un análisis económico preliminar para evaluar su viabilidad. Para aplicar la circularidad en el proceso, se discutió la reutilización de agua y nutrientes. Finalmente, se exploraron las posibilidades de emplear la espirulina residual como bioadsorbente para tratar aguas residuales industriales, transformando un subproducto en una solución ambiental. Como resultado, el proceso con enfoque circular presentó mejores resultados económicos y fue también viable técnicamente.

Palabras clave: espirulina, microalgas, valorización de residuos, circularidad.

Abstract

This work presents a process design for spirulina production, with an emphasis on circularity. The feasibility of cultivating spirulina in Tumbaco, Ecuador, was analyzed, and a tubular photobioreactor was proposed for its cultivation. The process was designed using a block diagram, along with a mass balance to quantify the inputs and outputs involved in the production of powdered spirulina, from cultivation to packaging. Additionally, a preliminary economic analysis was conducted to evaluate its feasibility. To implement circularity in the process, the reuse of water and nutrients was addressed. Furthermore, the potential use of residual spirulina as a bioadsorbent for treating industrial wastewater was explored, transforming a by-product into an environmental solution. As a result, the circular approach showed better economic performance and was also technically feasible.

Keywords: spirulina, microalgae, residue valorization, circularity.



Licencia Creative Commons
Atribución-NoComercial 4.0



Editado por /
Edited by:
Sebastián Ponce

Recibido /
Received:
22/12/2024

Aceptado /
Accepted:
02/04/2025

Publicado en línea /
Published online:
20/11/2025

INTRODUCCIÓN

Las microalgas son organismos celulares procariotas y eucariotas con un tamaño de aproximadamente 200 μm , que han atraído un creciente interés en la industria debido a sus amplias aplicaciones, como las energías renovables, los productos farmacéuticos y los suplementos alimenticios [1]. Las microalgas son microorganismos fotosintéticos capaces de adaptarse rápidamente a nuevos entornos, y tienen una excelente calidad nutricional en comparación con las plantas terrestres convencionales que se ingieren en la dieta humana, como por ejemplo la comparación nutricional de 100g de producto entre la espinaca y la espirulina, donde se muestra que hay mayores beneficios para la espirulina respecto a vitaminas, minerales y macronutrientes [2, 3]. Además de proteínas, contienen péptidos, carbohidratos, lípidos, vitaminas, pigmentos, minerales y otros valiosos oligoelementos, lo que los convierte en una fuente alternativa de proteínas para fines alimentarios y de alimentación animal [4, 5]. El uso de microalgas se remonta a siglos atrás, pues las algas verdeazules comestibles se han utilizado como alimento en culturas antiguas como los aztecas, quienes las utilizaban alrededor del año 1300, y se cree que también por los mayas. En África, la población ha recolectado espirulina durante siglos, mientras que en China, Mongolia, Tartaria y América del Sur se han consumido tradicionalmente otras algas verdeazules [6]. Sin embargo, el cultivo de microalgas tiene solo unas pocas décadas de antigüedad [7].

La espirulina es una microalga que ha alcanzado una considerable popularidad en el sector de la salud, la industria alimentaria y la acuicultura. Se considera segura para el consumo humano y tiene un contenido muy alto de macronutrientes y micronutrientes, aminoácidos esenciales, proteínas, lípidos, vitaminas, minerales y antioxidantes, lo que la convierte en un suplemento alimenticio completo para combatir las deficiencias nutricionales en los países en desarrollo [8].

El ciclo de crecimiento más corto, la mayor eficiencia fotosintética, el uso de tierras marginales para el cultivo, la naturaleza rica en lípidos y el potencial de productos comerciales valiosos vuelven a la espirulina más atractiva en comparación con la biomasa terrestre [9]. Debido a estas características, en todo el mundo se emplean diversas tecnologías para la producción en masa y el procesamiento de microalgas fotoautótrofas [4].

La espirulina se desarrolla y crece en el agua, además de que puede ser cosechada y procesada fácilmente. Adicionalmente, prospera en condiciones libres de pesticidas, con abundante luz solar y temperaturas moderadas, pero también es altamente adaptable y puede sobrevivir incluso en condiciones extremas [10]. Además, las microalgas son capaces de crecer en aguas residuales municipales, industriales o agrícolas. Por lo tanto, pueden recuperar eficientemente nutrientes como el nitrógeno y el fósforo de las corrientes de aguas residuales, mejorando su calidad [11].

Las microalgas requieren un procesamiento específico: se producen en instalaciones industriales controladas, donde se consideran el diseño del fotobiorreactor, la selección y optimización del medio de cultivo, las condiciones operativas, así como la cosecha y el secado de la biomasa [12]. Para establecer los parámetros económicos del cultivo de espirulina y de otras microalgas, es necesario conocer en detalle los procesos y equipos utilizados, así como las especificaciones para el uso de la biomasa generada [13].



La producción comercial de microalgas puede realizarse de manera integrada, en un ciclo que incluye el cultivo, la cosecha y la conversión en bioproductos, lo cual permite altos niveles de reciclaje de agua, nutrientes y energía, y favorece una producción sostenible a escala comercial [14]. El agua, el nitrógeno, el fósforo, el carbono orgánico y otros macronutrientes y micronutrientes presentes en las aguas residuales son adecuados para el crecimiento de las microalgas. Al fomentar dicho crecimiento, el agua residual se trata simultáneamente, lo que reduce los costos tanto del tratamiento de aguas como de la producción de biomasa, disminuye significativamente el impacto ambiental de procesos alternativos y permite sustituir fertilizantes costosos y no sostenibles [15].

Diseñar un proceso de producción de espirulina que aproveche todas las ventajas de esta microalga representa una oportunidad para generar beneficios tanto económicos como ambientales. En el presente trabajo se propone el diseño de un proceso que abarca desde el cultivo del alga hasta el empaquetado de la espirulina en polvo, incluyendo el análisis de las operaciones unitarias, el balance de masas y los costos asociados. A partir del enfoque de economía circular, se considera el uso de aguas residuales provenientes de otras industrias para el cultivo, así como el aprovechamiento de los residuos de microalga para tratar el agua del proceso y su posible comercialización como insumo para otras industrias que requieren soluciones para el tratamiento de aguas.

METODOLOGÍA

Para la propuesta de diseño se empleó una metodología investigativa que incorporó conceptos y prácticas de los procesos industriales lineales, con el objetivo de innovar con el diseño y producción. La finalidad fue reducir desperdicios e incluir ciclos optimizando todo el proceso y las corrientes involucradas [16].

En el marco de la economía circular, se plantea la evaluación de residuos, en este caso, de las microalgas que no pasen el control de calidad, para así ser utilizadas en otras industrias. El objetivo es mantener el valor de los productos, materiales y recursos durante el mayor tiempo posible, especialmente el recurso hídrico, que también ayuda a reducir la entrada de materiales como los macronutrientes [17].

Para el diseño de un proceso se siguió una secuencia lógica que se puede resumir en 3 etapas:

1. El ordenamiento ayuda a establecer una secuencia lógica para establecer las unidades de operación.
2. La determinación de los balances de masa del proceso.
3. El análisis de costos de implementación de los procesos.

La elección de operaciones unitarias se determinó inicialmente con la ayuda de un diagrama de bloques, donde se representan las operaciones básicas para que se realice este proceso [18]. Posteriormente, se realiza una búsqueda de equipos que puedan ser empleados en este procesamiento, en función del caudal de producción.

Los ciclos se emplean para aquellos procesos en los que tienen lugar reacciones de transformación con porcentajes de conversión bajas, fenómenos de transferencia de



calor y masa poco eficientes. En este caso, el recurso considerado es el agua, para el cual se busca implementar un ciclo técnico que evalúe las condiciones y nutrientes que aun posee el agua para continuar con su uso [19]. Finalmente, se realizó un análisis económico de los procesos lineal y circular, basado en el cálculo del ISBL (*inside battery limits*) y OSBL (*outside battery limits*), así como en la evaluación de ítems para la estimación de costos y en el flujo de caja para la estimación del retorno [18].

En la Tabla 1 se exponen las bases de diseño de los dos procesos:

TABLA 1. Bases de diseño para la producción de espirulina.

CARACTERÍSTICA	PROCESO LINEAL	PROCESO CIRCULAR
Ubicación geográfica del cultivo*	Zonas tropicales y subtropicales Tumbaco	
Condiciones del cultivo*	Temperatura: 30 - 35 °C Humedad: 70 - 75 % Equipo: fotobiorreactores	
Cantidad de cepa de alga	1,76 kg	
Cantidad de nutrientes	N: 18 kg P: 4 kg K: 2,5 kg	
Cantidad de agua	Nueva: 12 000 L Reciclada en cada flujo: 11 978 L, nueva en cada flujo: 22 L.	Agua residual: 12 000 L
Origen del agua	Agua nueva + agua reciclada del proceso	Agua proveniente de camaroneras o destiladoras de alcohol + agua reciclada del proceso
Cantidad generada del producto final**	14 kg/día con 18 horas de producción, en lotes de 0,81 kg por hora	
Cantidad anual generada del producto final	Tomando como consideración que la cantidad de días laborables en el mes son 22, se ha utilizado este valor para calcular la cantidad anual de producto final que es 3 696 kg/año	
Forma de presentación del producto	Espirulina granulada	
Cantidad de venta del producto	0.5 Kg	
Tipo de empaque del producto	Empaques de papel	
Subproducto	Ninguno comercial	Se comercializará la espirulina seca que no cumpla con el tamaño para comercializar, al igual que el alga que no cumpla con el control de calidad posterior al cultivo.

*Datos recuperados de: [20, 21, 22, 23, 24, 25]

** El cálculo de cantidad generada del producto final se obtuvo con la producción de 14 kg/ día en 17 horas y 30 minutos, por lo que se tomó el inmediato superior de 18 horas. Las horas restantes de trabajo se destinarán a procesos no agregados de valor.

RESULTADOS

La espirulina requiere abundante luz, nutrientes y una temperatura alta [26]. Tumbaco, al ser una región subtropical, cumple con las condiciones para la producción de espirulina de buena calidad, a pesar de que el clima es cambiante. Sin embargo, es posible manipular los parámetros del cultivo para minimizar los efectos de la variación de las condiciones climáticas sobre el rendimiento y la calidad del cultivo [27].

Aunque se asegura que no existen diferencias entre el cultivo en sistemas abiertos o cerrados [28], en este proceso se propone el uso de un fotobiorreactor tubular. Esta elección, en línea con lo indicado por Soni et al. [8] permite tener un mejor control de las condiciones de cultivo, minimiza la pérdida de CO₂ y la evaporación del agua. Para el medio de cultivo, se consideró el uso de agua potable y agua tratada con nutrientes. No se definió el tratamiento del agua; sin embargo, se señala que el agua tratada por ósmosis inversa es la más apropiada para cultivar espirulina [27].

En este proceso se utiliza nitrógeno, fósforo, y potasio por ser los nutrientes más estudiados e importantes para el crecimiento del alga [29, 30]. En cuanto a la cantidad de agua, se reporta que se requieren entre 1 000-1 500 L de agua para producir 1 kg de biomasa de microalga [31]. Por lo tanto, para el proceso se considera el uso de 1 200 L de agua potable para la producción de 8,1 kg, lo que varía sustancialmente el balance de masas con respecto a la literatura.

El diagrama de bloques de los procesos actuales para la producción de espirulina se presenta de forma lineal. Es importante considerar que los parámetros de producción se mantienen en condiciones estándar, es decir, a temperaturas entre 20 y 25 °C y a 1 atm de presión. La única variación significativa ocurre en la etapa de secado, donde las temperaturas pueden alcanzar hasta 92 °C.

Las operaciones unitarias del proceso que le siguen al cultivo son el lavado, secado, trituración, tamizado y empaçado. Como la espirulina tiene sus filamentos dispuestos en una hélice alargada, la cosecha y filtración mediante pantallas es la recomendada en la literatura, coincidiendo con los equipos propuestos en el diseño de este proceso [32]. Se seleccionó un equipo de limpieza de flujo horizontal y se acopló a un molino planetario de bolas. El equipo de secado tendrá alimentación horizontal al igual que el tamiz de bolas. Esto es recomendable para evitar el esparcimiento o la pérdida de producto y así garantizar la recolección de espirulina. Finalmente, la espirulina en polvo que apruebe el tamaño de grano será embalada en una máquina de flujo.

Para el empaçado se proponen bolsas de papel kraft de capacidad de 500 g., aunque Kumar et al. [33] sugiere que un material como el polietileno proporciona una vida útil más larga, los hallazgos de Tutaroglu et al. [34] demuestran que los microplásticos están comúnmente presentes en los productos comerciales finales de espirulina, influenciadas directamente por el material del empaque.

El proceso lineal que puede observarse en la Figura 1 genera pérdida de material en el pretratamiento para la eliminación de contenido de agua y microalgas que no puedan cumplir los estándares de calidad para el resto de los procesos. Esto implica una



generación de residuos sin valor agregado, sin considerar la reutilización de agua de producción, que puede ser empleada y evaluada antes de la adición de macronutrientes para retornarla al cultivo. La recuperación del agua contiene nitrógeno y fósforo en un valor de 8 000 y 400 ppm, lo que implica que se puede seguir reutilizando y completar la cantidad empleada [35].

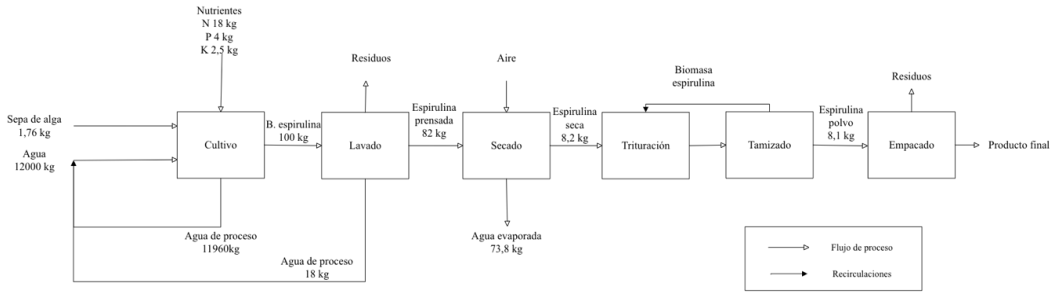


Figura 1. Diagrama de bloques del proceso lineal.

La circularidad se logra con la generación y búsqueda de procesos donde se puedan emplear los residuos como alimentación a otro proceso, como, por ejemplo, las microalgas que no pasan el control de calidad. Estas pueden ser empleadas en el tratamiento de aguas residuales de las industrias de curtiembre, donde se tiene aguas con metales pesados logrando una remoción del 99 % durante el crecimiento de las microalgas en este ambiente [36].

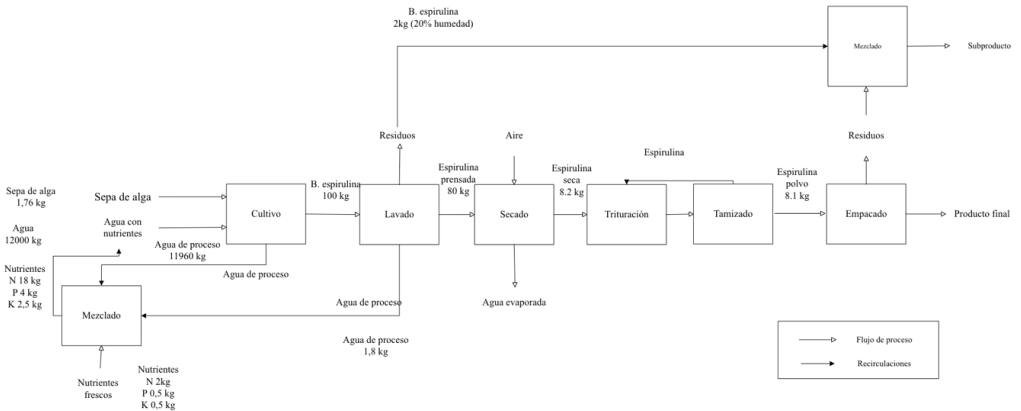


Figura 2. Diagrama de bloques del proceso circular para la producción de espirulina.

DISCUSIÓN

Como parte de la investigación, se analizaron los puntos críticos donde es posible introducir principios de ingeniería circular para reducir el impacto ambiental del proceso lineal. De acuerdo con Lim et al. [37], la etapa de cultivo presenta el mayor impacto



ambiental, principalmente debido a la generación de aguas residuales. Por esta razón, se propone la recirculación del agua con un pretratamiento que incluya la adición de nutrientes, a fin de garantizar un crecimiento óptimo de la espirulina.

Se ha considerado, en caso de ser necesario, la mezcla de nutrientes para cumplir con los requerimientos del proceso, lo cual concuerda con lo señalado por Bermúdez et al. [38], quien indica que, tras las etapas de lavado y cosecha, el agua puede ser reutilizada en múltiples ciclos. Conforme Krishnamoorthy et al. [39], la espirulina mostró un crecimiento favorable en aguas residuales provenientes de la industria de la destilería, lo que favorece al tratamiento de aguas residuales de otros procesos y a la reducción de la contaminación ambiental global.

Además, estudios han demostrado el desarrollo exitoso de espirulina en aguas residuales de la industria de la acuicultura, como es el caso de las camaronas, lo que representa una alternativa adicional para el uso de agua en este proceso [40, 41]. No obstante, dado que la producción de espirulina requiere condiciones específicas en cuanto a nutrientes para asegurar la calidad del producto comercial, se realizarán análisis químicos previos al ingreso del agua al sistema. Esto permitirá cuantificar las concentraciones de nutrientes presentes y, en caso necesario, poder incorporar nutrientes extra para tener la concentración apropiada antes de la recirculación.

Otro punto crítico fue identificado en el lavado que corresponde a la espirulina húmeda, y la trituración y tamizado, que corresponde a la espirulina seca. Se tiene en cuenta aquellas que no cumplan con el tamaño de grano o que no superen el control de calidad. Este residuo se podría comercializar como subproducto del proceso, lo cual se valida con lo mencionado por Meneses Barroso et al. [42], donde se obtuvieron buenos resultados de eficiencia, incluso mayores al 85 %, en la remoción de cromo mediante espirulina viva, y en menor cantidad con espirulina muerta. Adicionalmente, la espirulina no solo permitiría la remoción, sino incluso la recuperación del cromo evitando la generación de residuos secundarios de grandes industrias, como, por ejemplo, la de curtiembre [43].

En el caso del sistema circular se utilizaron los mismos equipos; sin embargo, al considerar el uso del agua residual proveniente de otras industrias como la de camarones y la destiladora de alcohol, se incluyó la instalación de una planta de tratamiento la cual se conectará al cultivo, como se muestra en la Figura 2. De igual manera, las condiciones generales de producción son normales, es decir, van de 20 a 25 °C y 1 atm de presión.

Para el análisis económico de los procesos, se estimaron los costos ISBL a partir de cotizaciones por catálogo de los equipos propuestos en cada proceso. A partir de este costo, se calculó el costo OSBL como el 40 % del costo ISBL y los costos de ingeniería e imprevistos como el 15 % del costo OSBL. Los costos ISBL fueron más elevados para el proceso circular debido a la incorporación de un sistema de tratamiento de aguas que además incrementa el costo en mano de obra, como se observa en la Tabla 2.

TABLA 2. Costos del proceso lineal y circular.

PROCESO	LINEAL	CIRCULAR
Capital Fijo		
ISBL	\$669 212,11	\$675 232,11
OSBL	\$267 684,84	\$270 092,84
Ingeniería	\$40 152,73	\$40 513,93
Imprevistos	\$40 152,73	\$40 513,93
COP Variable		
Materia prima/mes	\$1 850,62	\$1 370,62
Insumos/mes	\$246,40	\$246,40
Electricidad/mes	\$396,00	\$633,60
TOTAL, ANUAL	\$29 916,22	\$27 007,42
COP fijo		
Labor de operación (operarios)	\$44 160,00	\$49 680,00
Supervisor	\$25 560,00	\$25 560,00
Salariales directos	\$26 768,48	\$27 009,28
Mantenimiento	\$6 692,12	\$6 752,32
Impuestos	\$9 368,97	\$9 453,25
Alquiler de terreno	\$9 368,97	\$9 453,25
Gastos generales	\$6 271,75	\$6 646,20
TOTAL	\$128 190,30	\$134 554,31
Capital de Trabajo		
Inventario de materia	\$925,31	\$685,31
Valor de inventario	\$79 053,26	\$80 780,86
Efectivo	\$462,65	\$342,65
Cuentas por pagar	\$1 850,62	\$1 370,62
Crédito	\$1 850,62	\$1 370,62
Repuestos	\$9 368,97	\$9 453,25
TOTAL	\$93 511,43	\$94 003,31

El concepto de costo-beneficio declara que los proyectos se consideran económicamente viables si exceden los costos calculados [44], de modo que se calculó el beneficio neto anual. El proceso circular presentó un beneficio igual a \$17 324,52 mientras que el circular, gracias a ahorros en agua, nutrientes y a la venta de los residuos, ascendió a \$105 044,28, como se muestra en la Tabla 3. Se debe tener en cuenta que las estimaciones de costos incluyen predicciones de producción futura que están siempre asociadas a un nivel de incertidumbre.



Los datos considerados en este estimado pueden no ser relevantes en el futuro, ya que las condiciones del mercado pueden influir directamente en los costos y los posibles flujos futuros de efectivo pueden generar modificaciones en el escenario presentado [45].

TABLA 3. Análisis económico del proceso lineal y el proceso circular.

PROCESO	LINEAL	CIRCULAR	
Ítem	Observaciones	Observaciones	
Precio de venta	\$ 25,00	\$ 25,00	\$ 0,01
Ventas anuales	\$ 184 800,00	\$ 184 800,00	\$ 91 259,26
Margen bruto	\$ 159 635,78	\$ 256 655,04	
Beneficio bruto	\$26 693,49	\$114 497,53	
Beneficio neto	\$17 324,52	\$105 044,28	

Con base en una producción anual estimada de 3.696 kg y un precio de venta de 25,00 USD por kilogramo, —valor calculado a partir del promedio de precios de seis marcas que comercializan espirulina en polvo en el mercado nacional—, se realizó la proyección de ingresos del proceso. El análisis económico del modelo circular demostró ser completamente viable.

En la Figura 3 se puede apreciar que el primer año se tiene los costos de implementación con valores negativos por la cantidad de ingresos y la diferencia con el gasto de inversión. Al año 10 se puede ver que se empieza a tener ganancias. Por otro lado, en la Figura 4 se expresan valores positivos desde el primer año. Esto se debe a los ingresos adicionales provenientes de la venta de subproductos del proceso, así como de la recuperación de materias primas reutilizables, lo que contribuye a reducir los costos operativos.

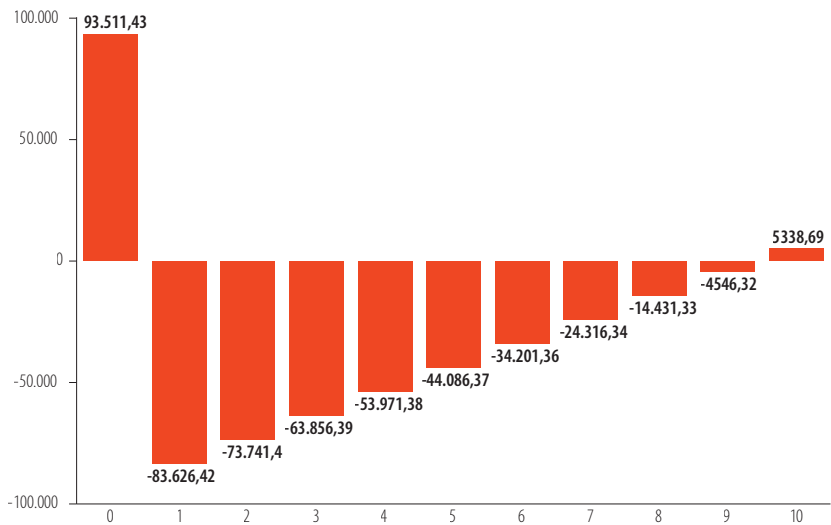


Figura 3. Flujo de caja del proceso lineal.

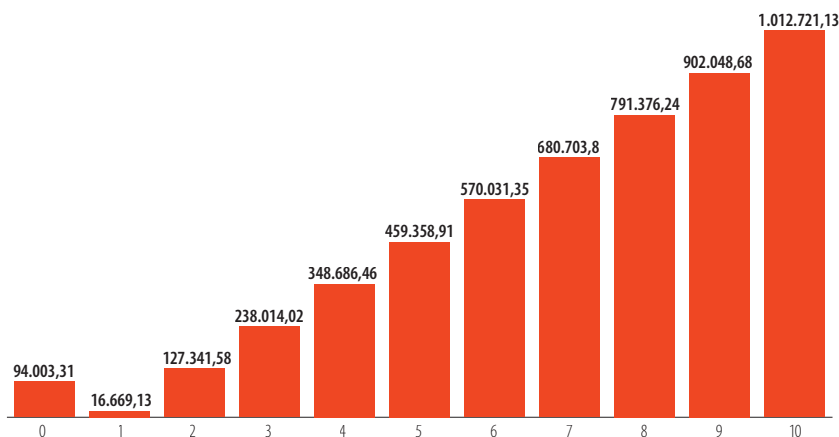


Figura 4. Flujo de caja del proceso circular.

CONCLUSIONES

El cultivo de espirulina en Tumbaco tiene un gran potencial para el desarrollo de una producción sostenible y rentable. En comparación con el proceso lineal, la implementación de principios de circularidad en el proceso, como la reutilización del agua residual y el aprovechamiento de los residuos de espirulina, contribuye a minimizar el impacto ambiental y maximizar los beneficios económicos, con ganancias desde el primer año de implementación. Es necesario continuar investigando y desarrollando tecnologías para optimizar el proceso de producción circular de espirulina y ampliar las aplicaciones de este producto.

AGRADECIMIENTOS

El presente proyecto se llevó a cabo dentro del curso "Diseño e Ingeniería Circular" del programa de Maestría en Ingeniería Circular de la Universidad San Francisco de Quito USFQ.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

Javier Sayavedra-Delgado: conceptualización, metodología, redacción, preparación de borradores originales

Marielisa Bravo-Cordero: curación de datos, redacción, preparación de borradores originales.

Estefanía Haro-Viteri: curación de datos, redacción, preparación de borradores originales, validación, investigación.

José Álvarez-Barreto: revisión y edición.



DECLARACIÓN SOBRE EL USO DE TECNOLOGÍAS DE IA GENERATIVA Y ASISTIDA EN LA REDACCIÓN

Durante la preparación de este trabajo, los autores utilizaron GEMINI con el propósito de realizar una búsqueda avanzada de información relevante. Posteriormente, los autores revisaron y editaron el contenido según consideraron necesario, asumiendo la plena responsabilidad por la versión final del texto y su contenido publicado.

DECLARACIÓN DE DISPONIBILIDAD DE DATOS

No se generaron nuevos datos en este estudio.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses relacionados con el presente trabajo.

REFERENCIAS

- [1] Zuccaro, G., Yousuf, A., Pollio, A., & Steyer, J. P.(2019). Microalgae cultivation systems. In *Microalgae Cultivation for Biofuels Production* (pp. 11–29). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817536-1.00002-3>
- [2] Gutiérrez-Salmeán, G., Fabila-Castillo, L., & Chamorro-Cevallos, G.(2015). Nutritional and toxicological aspects of Spirulina (Arthrospira). *Nutrición hospitalaria: Órgano oficial de la Sociedad española de nutrición parenteral y enteral* (SENPE), 32(1), 34–40. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5177724>
- [3] Valero, T., Rodríguez, P., Ruiz, E., Ávila, J., & Varela, G. (2018). *La alimentación española. Características nutricionales de los principales alimentos de nuestra dieta*. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. <https://www.fen.org.es/storage/app/media/imgPublicaciones/2018/libro-la-alimentacion-espanola.pdf>
- [4] Becker, E. W.(2007). Micro-algae as a source of protein. *Biotechnology Advances*, 25(2), 207–210. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2006.11.002>
- [5] Danesi, E. D. G., Rangel-Yagui, C. O., Carvalho, J. C. M., & Sato, S.(2004). Effect of reducing the light intensity on the growth and production of chlorophyll by Spirulina platensis. *Biomass and Bioenergy*, 26(4), 329–335. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(03\)00127-2](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(03)00127-2)
- [6] García, J. L., Vicente, M. De, & Galán, B.(2018). Presente y futuro del cultivo de las microalgas para su uso como superalimentos. *Mediterráneo económica*, (31), 333–350. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6648784>
- [7] Spolaore, P., Joannis-Cassan, C., Duran, E., & Isambert, A.(2006). Commercial applications of microalgae. *Journal of bioscience and bioengineering*, 101(2), 87–96. <https://doi.org/10.1263/jbb.101.87>
- [8] Soni, R. A., Sudhakar, K., & Rana, R. S.(2017). Spirulina – From growth to nutritional product: A review. *Trends in Food Science and Technology*, 69, 157–171. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.09.010>
- [9] Hong, Y., Chen, W., Luo, X., Pang, C., Lester, E., & Wu, T. (2017). Microwave-enhanced pyrolysis of macroalgae and microalgae for syngas production. *Bioresourcetchnology*, 237, 47–56. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.02.006>
- [10] Hossain, M. N. Bin, Basu, J. K., & Mamun, M. (2015). The production of ethanol from micro-algae spirulina. *Procedia Engineering*, 105, 733–738. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.05.064>
- [11] Lee, E., Jalalizadeh, M., & Zhang, Q.(2015). Growth kinetic models for microalgae cultivation: A review. *Algal research*, 12, 497–512. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2015.10.004>
- [12] Lafarga, T., Sánchez-Zurano, A., Villaró, S., Morillas-España, A., & Acién, G. (2021). Industrial production of spirulina as a protein source for bioactive peptide generation. *Trends in Food Science & Technology*, 116, 176–185. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.07.018>
- [13] Costa, J. A. V., Freitas, B. C. B., Rosa, G. M., Moraes, L., Moraes, M. G., & Mitchell, B. G. (2019). Operational and economic aspects of Spirulina-based biorefinery. *Bioresourcetchnology*, 292, 121946. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121946>
- [14] Kern, J. D., Hise, A. M., Characklis, G. W., Gerlach, R., Viamajala, S., & Gardner, R. D.(2017). Using life cycle assessment and techno-economic analysis in a real options framework to inform the design of algal biofuel production facilities. *Bioresourcetchnology*, 225, 418–428. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.11.116>
- [15] Xin, C., Addy, M. M., Zhao, J., Cheng, Y., Cheng, S., Mu, D., Liu, Y., Ding, R., Chen, P., & Ruan, R. (2016). Comprehensive techno-economic analysis of wastewater-based algal biofuel production: A case study. *Bioresourcetchnology*, 211, 584–593. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.03.102>
- [16] Bofylatos, S. (2022). Upcycling systems design, developing a methodology through design. *Sustainability*, 14(2), 600. <https://doi.org/10.3390/su14020600>
- [17] Olabi, A. G., Shehata, N., Sayed, E. T., Rodriguez, C., Anyanwu, R. C., Russell, C., & Abdelkareem, M. A. (2023). Role of microalgae in achieving sustainable development goals and circular economy. *Science of The Total Environment*, 854, 158689. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158689>
- [18] Seider, W. D., Lewin, D. R., Seader, J. D., Widagdo, S., Gani, R., & Ng, K. M. (2016). *Product and process design principles: synthesis, analysis and evaluation*. John Wiley & Sons.

- [19] Gil Chaves, I. D., López, J. R. G., García Zapata, J. L., Leguizamón Robayo, A., & Rodríguez Niño, G. (2016). *Process analysis and simulation in chemical engineering*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-14812-0>
- [20] Carrillo, P. C. (2019). *Diseño de una planta agroindustrial para la producción de espirulina (Arthrospira platensis) en polvo en la parroquia de Pintag, cantón Quito*. [Tesis de licenciatura, Universidad de Las Américas]. <https://dspace.udla.edu.ec/handle/33000/11317>
- [21] Cruz Woo, G. (2022). *Manual para el cultivo artesanal de espirulina (Arthrospira spp.) en San Salvador Atenco, México* [Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Xochimilco]. <https://repositorio.xoc.uam.mx/jspui/bitstream/123456789/26746/1/250170.pdf>
- [22] Ramos, L. (2019). *Análisis de experiencias de mejora continua en la producción industrial de espirulina. Una revisión sistemática* [Tesis de pregrado, Universidad Privada del Norte]. <https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/24517>
- [23] Rodríguez, A. & Triana, F. (2006). Evaluación del pH en el cultivo de *Spirulina* spp. (*Arthrospira*) bajo condiciones de laboratorio [Tesis de pregrado, Pontificia Universidad Javeriana]. <https://doi.org/10.60794/x6dx-n554>
- [24] Puetate, F. A. M., Insuasti, J. A. P., Revelo, D. A. B., & Soto, C. A. P. (2021). Producción de espirulina (*Arthrospira platensis*): una revisión. *Revista Biorrefinería*, 4(4). <https://www.cebaecuador.org/wp-content/uploads/2022/01/16.pdf>
- [25] Barra Galárraga, R. F. (2013). *Diseño de un fotobioreactor industrial para cultivo de Spirulina (Arthrospira platensis)* [Tesis de licenciatura, Escuela Superior Politécnica del Litoral]. Repositorio ESPOL. <https://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/24663>
- [26] Richmond, A. (1987). The challenge confronting industrial microagriculture: High photosynthetic efficiency in large-scale reactors. En M. A. Ragan & C. J. Bird (Eds.), *Twelfth International Seaweed Symposium (Developments in Hydrobiology*, vol. 41, pp. 117–121). Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-009-4057-4_16
- [27] Jiménez, C., Cossío, B. R., Labella, D., & Niell, F. X. (2002). The feasibility of industrial production of *Spirulina* (*Arthrospira*) in Southern Spain. *Aquaculture*, 217(1-4), 179-190. [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(02\)00118-7](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(02)00118-7)
- [28] Barrón, B. L., Torres-Valencia, J. M., Chamorro-Cevallos, G., & Zúñiga-Estrada, A. (2007). *Spirulina* as an antiviral agent. In *Spirulina in human nutrition and health* (pp. 241-256). CRC Press.
- [29] Belay, A. (2013). Biology and industrial production of *Arthrospira* (*Spirulina*). In A. Richmond & Q. Hu (Eds.), *Handbook of microalgal culture: Applied phycology and biotechnology* (2.ª ed., pp. 339–358). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781118567166.ch17>
- [30] Vonshak, A. (1997). *Spirulina platensis (Arthrospira): Physiology, cell-biology and biotechnology*. CRC Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1201/9781482272970>
- [31] Villaró-Cos, S., Sánchez, J. L. G., Ación, G., & Lafarga, T. (2024). Research trends and current requirements and challenges in the industrial production of spirulina as a food source. *Trends in Food Science & Technology*, 143. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.104280>
- [32] Santillan, C. (1982). Mass production of *Spirulina*. *Experientia*, 38(1). <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/BF01944524>
- [33] Kumar, K. R., Mahadevaswamy, M., & Venkataraman, L. V. (1995). Storage quality of powdered cyanobacterium—*spirulina platensis*. *Zeitschrift für Lebensmittel-Untersuchung und Forschung*, 201(3), 289-292. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/BF01193006>
- [34] Tutaroglu, S., Uslu, L., & Gündoğdu, S. (2024). Microplastic contamination of packaged spirulina products. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(1), 1114-1126. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3281279/v1>
- [35] Ación Fernández, F. G., Gómez-Serrano, C., & Fernández-Sevilla, J. M. (2018). Recovery of nutrients from wastewaters using microalgae. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 2, 59. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2018.00059>
- [36] Serrà, A., Artal, R., García-Amorós, J., Gómez, E., & Philippe, L. (2020). Circular zero-residue process using microalgae for efficient water decontamination, biofuel production, and carbon dioxide fixation. *Chemical Engineering Journal*, 388, 124278. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.124278>
- [37] Lim, H. R., Khoo, K. S., Chew, K. W., Chang, C. K., Munawaroh, H. S. H., Kumar, P. S., Huy, N. D., & Show, P. L. (2021). Perspective of *Spirulina* culture with wastewater into a sustainable circular bioeconomy. *Environmental Pollution*, 284. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117492>



- [38] González, J. L. B., Suárez, R. S. R., González, E. C. B., & Vot, C. (2018). Desarrollo de un modelo de negocio basado en la producción de Spirulina y productos derivados. *Emprendimiento e innovación Empresarial*, 1(1), 129-148.
- [39] Krishnamoorthy, S., Manickam, P., & Muthukaruppan, V. (2019). Evaluation of distillery wastewater treatability in a customized photobioreactor using blue-green microalgae—Laboratory and outdoor study. *Journal of Environmental Management*, 234, 412-423. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.01.014>
- [40] Cardoso, L. G., Duarte, J. H., Costa, J. A. V., de Jesús Assis, D., Lemos, P. V. F., Druzian, J. I., de Souza, C. O., Nunes, I. L., & Chinalia, F. A. (2021). Spirulina sp. as a bioremediation agent for aquaculture wastewater: production of high added value compounds and estimation of theoretical biodiesel. *BioEnergy Research*, 14(1), 254-264. <https://doi.org/10.1007/s12155-020-10153-4>
- [41] Chuntapa, B., Powtongsook, S., & Menasveta, P. (2003). Water quality control using *Spirulina platensis* in shrimp culture tanks. *Aquaculture*, 220(1-4), 355-366. [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(02\)00428-3](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(02)00428-3)
- [42] Barroso, Y. M. M., Mantilla, P. A. P., & Perez, J. F. B. (2019). Remoción de cromo en aguas residuales industriales mediante el uso de biomasa de *Spirulina* sp, sedimentación primaria y precipitación química. *Revista de investigación agraria y ambiental*, 10(1), 141-152. <https://doi.org/10.22490/21456453.2326>
- [43] Jácome-Pilco, C., Ballesteros, C., Rea, E., & Rea Cayambe, L. M. (2021). Microalgas en el tratamiento de aguas residuales generadas en industrias de curtiembres. *Ciencia y Tecnología*, 14(2), 47-55. <https://doi.org/10.18779/cyt.v14i2.502>
- [44] Griffin, R. C. (1998). The fundamental principles of cost-benefit analysis. *Water resources research*, 34(8), 2063-2071. <https://doi.org/10.1029/98WR01335>
- [45] Solarte, J. C. M., & Mayorga, X. S. (2014). Modelo de un sistema de costos ABC en escenarios de incertidumbre. *Libre Empresa*, 11(1), 171-185. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6586851>

MATERIAL SUPLEMENTARIO

1 – Balance de masas

PROCESO	ENTRADA	CANTIDAD (KG)	SALIDA	CANTIDAD (KG)
Cultivo	Materia prima	11,76	Biomasa de espirulina	10
	Agua (L)	12 000	Agua residual	11 960
	Nitrógeno (N)	1,8		
	Fósforo (P)	0,4		
	Potasio (K)	0,25		
Filtrado	Biomasa de espirulina	10	Espirulina húmeda	9,3
	Agua residual	0,7	Agua residual	0,7
Prensado	Espirulina húmeda	9,3	Espirulina prensada	8,2
	Agua residual	1,1	Agua residual	1,1
Secado	Espirulina prensada	8,2	Espirulina seca	0,82
	Agua evaporada	7,38	Agua evaporada	7,38
Trituración	Espirulina seca	0,82	Espirulina en polvo	0,81
Pérdidas				0,01
Total				0,81

Se ha considerado la eficiencia del 85 %.

2 – Selección de equipos con precio

EQUIPOS	COSTO DEL EQUIPO
Fotobiorreactor	\$ 532 000,00
Equipo de limpieza	\$ 9 210,22
Molino	\$ 5 667,82
Equipo de secado	\$ 111 300,00
Tamiz de bolas	\$ 5 012,00
Máquina de embalaje de flujo	\$ 6 022,07
Sistema de tratamiento de aguas residuales (solo circular)	\$ 6 020,00
Total	\$ 675 232,11

2 – Costos precios proceso lineal

Ítem	Observaciones
Capital Fijo	
ISBL	\$669 212,11
OSBL	\$267 684,84
Ingeniería	\$40 152,73
Imprevistos	\$40 152,73
COP Variable	
Materia prima/mes	\$ 1 850,62
Insumos/mes	\$ 246,40
Electricidad/mes	\$ 396,00
TOTAL ANUAL	\$ 29 916,22
COP Fijo	
Labor de operación (operarios)	\$44 160,00
Supervisor	\$25 560,00
Salariales directos	\$26 768,48
Mantenimiento	\$6 692,12
Impuestos	\$9 368,97
Alquiler de terreno	\$9 368,97
Gastos generales	\$6 271,75
TOTAL	\$128 190,30
Capital de Trabajo	
Inventario de materia	\$925,31
Valor de inventario	\$79 053,26
Efectivo	\$462,65
Cuentas por pagar	\$1 850,62
Crédito	\$1 850,62
Repuestos	\$9 368,97
TOTAL	\$93 511,43
ÍTEM	
Precio de venta	\$ 25,00
Ventas Anuales	\$ 184 800,00
Margen Bruto	\$159 635,78
Beneficio Bruto	\$26 693,49
Beneficio Neto	\$17 324,52



Año	Beneficio Neto	Depreciación	Ingreso Imponible	Impuesto	Flujo de Caja	Flujo Acumulativo	Saldo
			ben neto-depre	15 % imponible	ben neto-imp		flujo acum-cap fijo
0	\$-				\$-	\$-	\$93 511,43
1	\$17 324,52	\$66 921,21	\$-49 596,70	\$-7 439,50	\$9 885,01	\$9 885,01	\$-83 626,42
2	\$17 324,52	\$66 921,21	\$-49 596,70	\$-7 439,50	\$9 885,01	\$19 770,02	\$-73 741,40
3	\$17 324,52	\$66 921,21	\$-49 596,70	\$-7 439,50	\$9 885,01	\$29 655,04	\$-63 856,39
4	\$17 324,52	\$66 921,21	\$-49 596,70	\$-7 439,50	\$9 885,01	\$39 540,05	\$-53 971,38
5	\$17 324,52	\$66 921,21	\$-49 596,70	\$-7 439,50	\$9 885,01	\$49 425,06	\$-44 086,37
6	\$17 324,52	\$66 921,21	\$-49 596,70	\$-7 439,50	\$9 885,01	\$59 310,07	\$-34 201,36
7	\$17 324,52	\$66 921,21	\$-49 596,70	\$-7 439,50	\$9 885,01	\$69 195,08	\$-24 316,34
8	\$17 324,52	\$66 921,21	\$-49 596,70	\$-7 439,50	\$9 885,01	\$79 080,09	\$-14 431,33
9	\$17 324,52	\$66 921,21	\$-49 596,70	\$-7 439,50	\$9 885,01	\$88 965,11	\$-4 546,32
10	\$17 324,52	\$66 921,21	\$-49 596,70	\$-7 439,50	\$9 885,01	\$98 850,12	\$5 338,69

AÑO	SALDO
0	\$93 511,43
1	\$-83 626,42
2	\$-73 741,40
3	\$-63 856,39
4	\$-53 971,38
5	\$-44 086,37
6	\$-34 201,36
7	\$-24 316,34
8	\$-14 431,33
9	\$-4 546,32
10	\$5 338,69

3 – Costos precios proceso circular

Ítem	Observaciones
Capital Fijo	
ISBL	\$675 232,11
OSBL	\$270 092,84
Ingeniería	\$40 513,93
Imprevistos	\$40 513,93
COP Variable	
Materia prima/mes	\$1 370,62
Insumos/mes	\$246,40
Electricidad/mes	\$633,60
TOTAL ANUAL	\$27 007,42
COP Fijo	
Labor de operación (operarios)	\$49 680,00
Supervisor	\$25 560,00
Salariales directos	\$27 009,28
Mantenimiento	\$6 752,32
Impuestos	\$9 453,25
Alquiler de terreno	\$9 453,25
Gastos generales	\$6 646,20
TOTAL	\$134 554,31
Capital de Trabajo	
Inventario de materia	\$685,31
Valor de inventario	\$80 780,86
Efectivo	\$342,65
Cuentas por pagar	\$1 370,62
Crédito	\$1 370,62
Repuestos	\$9 453,25
TOTAL	\$94 003,31

ÍTEM	OBSERVACIONES	OBSERVACIONES
Precio de venta	\$25,00	\$0,01
Ventas Anuales	\$184 800,00	\$91 259,26
Margen Bruto		\$256 655,04
Beneficio Bruto		\$1 14 497,53
Beneficio Neto		\$105 044,28



Año	Beneficio Neto	Depreciación	Ingreso Imponible	Impuesto	Flujo de Caja	Flujo Acumulativo	Saldo
			ben neto-depre	15 % imponible	ben neto-imp		flujo acum-cap fijo
0	\$-				\$-	\$-	\$94 003,31
1	\$105 044,28	\$67 523,21	\$37 521,07	\$5 628,16	\$110 672,44	\$110 672,44	\$16 669,13
2	\$105 044,28	\$67 523,21	\$37 521,07	\$5 628,16	\$110 672,44	\$221 344,89	\$127 341,58
3	\$105 044,28	\$67 523,21	\$37 521,07	\$5 628,16	\$110 672,44	\$332 017,33	\$238 014,02
4	\$105 044,28	\$67 523,21	\$37 521,07	\$5 628,16	\$110 672,44	\$442 689,78	\$348 686,46
5	\$105 044,28	\$67 523,21	\$37 521,07	\$5 628,16	\$110 672,44	\$553 362,22	\$459 358,91
6	\$105 044,28	\$67 523,21	\$37 521,07	\$5 628,16	\$110 672,44	\$664 034,66	\$570 031,35
7	\$105 044,28	\$67 523,21	\$37 521,07	\$5 628,16	\$110 672,44	\$774 707,11	\$680 703,80
8	\$105 044,28	\$67 523,21	\$37 521,07	\$5 628,16	\$110 672,44	\$885 379,55	\$791 376,24
9	\$105 044,28	\$67 523,21	\$37 521,07	\$5 628,16	\$110 672,44	\$996 052,00	\$902 048,68
10	\$105 044,28	\$67 523,21	\$37 521,07	\$5 628,16	\$110 672,44	\$1 106 724,44	\$1 012 721,13

AÑO	SALDO
0	\$94 003,31
1	\$16 669,13
2	\$127 341,58
3	\$238 014,02
4	\$348 686,46
5	\$459 358,91
6	\$570 031,35
7	\$680 703,80
8	\$791 376,24
9	\$902 048,68
10	\$1 012 721,13

Efecto de la suplementación con ensilaje de maíz y yuca en el desempeño productivo y económico del ovino criollo (*Ovis aries*)

Emiro Andrés Suárez Paternina¹, Yacerney Paternina Paternina¹, Liliana Atencio Solano², José Jaime Tapia Coronado², Wilson Andrés Barragán Hernández², Lorena Inés Mestra Vargas²

¹Corporación colombiana de investigación agropecuaria (AGROSAVIA), Sede El Carmen de Bolívar, Bolívar, Colombia

²Corporación colombiana de investigación agropecuaria (AGROSAVIA), Centro de Investigación Turipaná, Córdoba, Colombia.

³Corporación colombiana de investigación agropecuaria (AGROSAVIA), Centro de Investigación El Nus, Antioquia, Colombia.

*Autor para correspondencia/Corresponding author: esuarez@agrosavia.co

Effect of mayze and cassava silage on the economic and productive performance of hair creole sheep (*Ovis aries*)

Resumen

El presente trabajo evaluó el desempeño productivo y la viabilidad económica de la suplementación de ovinos criollos con ensilajes de maíz y yuca forrajera. Se seleccionaron 12 machos con un peso vivo promedio de $17,6 \pm 3,2$ kg y 8 meses de edad, los cuales fueron aleatorizados en dos grupos: uno suplementado con ensilaje de maíz (D1EM) y otro con una mezcla de ensilaje de maíz y ensilaje de yuca (D2EM+EY) en proporciones iguales. Los animales fueron evaluados durante 52 días, incluidos 10 días de adaptación en el período seco. Se registró el desempeño productivo en ganancia de peso, condición corporal, consumo de ensilaje y coloración de la conjuntiva ocular (como indicador de anemia); además se recolectó información sobre costos e ingresos. Los datos productivos se analizaron mediante una prueba t para muestras independientes. Se observó un efecto estadísticamente significativo ($p < 0,05$) de la suplementación con D2EM+EY, con una mayor ganancia diaria ($0,080 \pm 0,01$ kg/d vs. $0,060 \pm 0,01$ kg/d) y acumulación de peso durante el período de estudio ($3,33 \pm 0,58$ kg vs $2,45 \pm 0,43$ kg), así como una mejor conversión alimenticia (kg:kg, 6,01:1 vs 8,27:1) y un menor grado de anemia. La suplementación con D2EM+EY presentó una relación beneficio-coste de 2,4 y una rentabilidad del período del 72 %, con un costo de producción de USD 0,93 por kg de peso vivo. La suplementación estratégica con ensilaje de maíz y yuca incrementó las ganancias de peso y mantuvo la condición corporal de los animales durante el período de sequía, generando mayores ingresos en relación con los costos de producción.

Palabras clave: alimentación complementaria, cultivos forrajeros, ensilaje, ganancia de peso, periodo seco.

Abstract

This study evaluated the productive performance and economic viability of supplementing Creole lambs with mayze and cassava forage silage. Twelve males ($17.6 \pm$



Licencia Creative Commons
Atribución-NoComercial 4.0



Editado por /
Edited by:

María Gabriela Albán

Recibido /
Received:
08/01/2025

Aceptado /
Accepted:
24/03/2025

Publicado en línea /
Published online:
06/08/2025



3.2 kg live weight and 8 months old) were selected and randomized into two groups, one supplemented with maize silage (D1CS) and another with a mixture of maize and cassava silage (D2CS+CaS) in equal proportions. The animals were evaluated for a period of 52 days, including 10 days of adaptation during the dry period. Productive performance in weight gain, body corporal condition, silage intake, and ocular conjunctiva coloration (as an anemia indicator) was recorded. Information on costs and income was also collected. The data was analyzed with an independent sample T-test. The D2CS+CaS increased ($p < 0.05$) daily gain (0.080 ± 0.01 kg/d vs. 0.060 ± 0.01 kg/d) and accumulated weight in the evaluation period (3.33 ± 0.58 kg vs. 2.45 ± 0.43 kg). Additionally, the D2CS+CaS supplementation led to a reduction in feed conversion ratio (kg: kg, 6.01:1 vs. 8.27:1) and a lower degree of anemia. The supplementation of D2CS+CaS resulted in a benefit-cost ratio of 2.4 and profitability of 72 %, with a production cost of US\$ 0.93 per kg of live weight. Strategic supplementation of maize and cassava silage resulted in increased weight gain and the maintenance of optimal body condition during drought conditions, yielding a higher income than production costs.

Keywords: supplementary feeding, feed crops, silage, weight gain, dry season.

INTRODUCCIÓN

En condiciones tropicales es recurrente que se presenten periodos de sequía prolongados, lo cual afecta de manera significativa el desempeño productivo de los rumiantes, debido a la baja disponibilidad y calidad nutricional de los forrajes [1]. Particularmente, en la región caribe colombiana hay cerca de 6,7 millones de hectáreas establecidas en pasturas, en su mayoría naturalizadas, siendo el principal recurso forrajero para la alimentación y producción de ovinos [2]. Sin embargo, los rebaños enfrentan serias limitantes que se relacionan principalmente con la baja productividad y composición nutricional de las praderas, que son afectadas por la estacionalidad de las lluvias, con efecto negativo en los indicadores productivos [2,3].

La conservación de forrajes energético-proteicos a través del ensilaje es una de las principales estrategias para afrontar los periodos críticos [4]. En este sentido, el maíz (*Zea mays* L.) se considera el principal recurso forrajero utilizado como ensilaje en sistemas de alimentación de rumiantes en la región caribe colombiana [5, 2], caracterizándose por su alto rendimiento forrajero y aporte energético. Es de resaltar que en la alimentación de rumiantes es fundamental considerar la inclusión de forrajes ricos en proteína o fuentes proteicas para tener un mejor balance nutricional, digestibilidad y aporte de nutrientes [6, 2].

La suplementación con fuentes proteicas concentradas ha sido descrita como una alternativa para afrontar periodos críticos y mejorar el desempeño productivo de ovinos [7, 8]. Sin embargo, el uso de alimentos concentrados puede incrementar los costos de producción [9, 10]. En contraste, se ha demostrado que la implementación de estrategias alimenticias con ensilaje es una opción viable desde el punto de vista económico y productivo en los sistemas de producción ovino [11]. No obstante, además del aporte energético que puede ofrecer el ensilaje de maíz, se requiere suplir las demandas de proteína.



En este sentido, el cultivo de yuca (*Manihot esculenta* Crantz) resulta ser una opción relevante en los sistemas de alimentación de rumiantes, debido a su alta producción de masa forrajera caracterizada nutricionalmente por un alto contenido de proteína (20-25 %) y alta digestibilidad [12, 13, 14]. Además, presenta tolerancia a la sequía [15] y adaptación a diversos tipos de suelo [16]. A pesar de esto, la yuca posee glucósidos cianogénicos, los cuales pueden generar intoxicaciones y muerte de los animales. Esta toxicidad puede eliminarse en un 90 % por medio del picado, presecado al sol y la fermentación, garantizando su uso en la alimentación animal [13]. Por otra parte, el ensilaje de maíz es un recurso alimenticio, de amplio uso en sistemas de producción de carne y leche, debido a su alto contenido energético y de nutrientes digestibles, además de su palatabilidad, que mejoran la ingesta de materia seca y el rendimiento general del crecimiento en rumiantes [17, 18, 19].

Asimismo, el ensilaje de maíz y yuca han sido aprovechados como estrategias en la alimentación de ovinos, ya sea de manera individual o en combinación, debido a su potencial para optimizar el aprovechamiento de los recursos forrajeros y mejorar la producción de animales. Diversos estudios han demostrado que su inclusión en la dieta influye positivamente en el comportamiento ingestivo, la tasa de crecimiento, las características cárnicas de la canal y la salud, lo cual es relevante en sistemas de producción ovina [20, 21, 22, 23, 24]. No obstante, sus efectos pueden estar influenciados por factores como el régimen alimenticio, la calidad del ensilado y su composición, así como las diferentes condiciones de producción. Por lo anterior el objetivo de este estudio fue evaluar el desempeño productivo y la viabilidad económica de la suplementación en ovinos criollos con ensilaje de maíz y la mezcla de ensilaje de maíz y yuca forrajera.

METODOLOGÍA

Localización

El trabajo se desarrolló en la Sede El Carmen de Bolívar, perteneciente a la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - AGROSAVIA, ubicada en el departamento de Bolívar (Colombia); localizada a 125 m. s. n. m., con latitud 9,718333 y longitud 75,104583. La zona está clasificada como bosque seco tropical con temperatura promedio de 27,4 °C, humedad relativa de 72 %, tiene un promedio mensual de brillo solar de 234,5 h y una precipitación anual de 1 099 mm. En la zona de estudio, la época de lluvias se extiende de abril a noviembre, donde se acumula aproximadamente el 85 % de la precipitación anual, mientras que la época seca abarca desde noviembre hasta mediados de abril.

Elaboración de ensilaje

El ensilaje de maíz se realizó con la variedad de grano amarillo Agrosavia V-117 [25], mientras que, para el ensilaje de yuca forrajera se utilizó la variedad Agrosavia SM 1511-6 [26], las cuales fueron establecidas de acuerdo con el manejo agronómico descrito por Mejía-Kerguelen et al. [27], con una densidad poblacional de 62 500 y 40 000 plantas ha⁻¹, respectivamente. La cosecha se realizó a los 78 días después de siembra (dds) para maíz y 90 días dds para la yuca, con rendimientos forrajeros aproximados de 32 y 70 t ha⁻¹, respectivamente.



Se utilizó una formaleta metálica de forma circular y desarmable para conservar el forraje con capacidad de almacenamiento de una tonelada [14]. El proceso de elaboración del ensilaje del forraje inició con la extensión en el suelo de un plástico calibre 4 (0,1016 mm), sobre el cual se armó la formaleta. Luego, se picó el forraje con un triturador de forraje (Trapp® TRF-650, Jaraguá do Sul/SC – Brasil) y se depositaron capas de material picado, con un diámetro de partícula aproximado de 2 cm, en capas de 25 cm para facilitar la compactación del material y eliminación del aire presente en el forraje. Este proceso se llevó a cabo hasta completar el volumen de la formaleta alcanzando una densidad de compactación de 400 kg m⁻³. Posteriormente, se desarmó la formaleta y se procedió a cubrir el material con una carpa plástica calibre 6 (0,1524 mm). Finalmente, el plástico se amarró con nylon de polipropileno para garantizar mayor hermetismo al forraje conservado.

En el caso de la yuca, el proceso de conservación del forraje fue similar al del maíz, sin embargo, se agregó melaza líquida (subproducto de la caña de azúcar) como aditivo, a razón del 1 % del volumen de forraje a ensilar, disuelta en 5 litros de agua. La solución se aplicó uniformemente con una pulverizadora agrícola de presión, con capacidad de 20 litros. El aprovechamiento del ensilaje de maíz se realizó a los 120 días después de su elaboración, mientras que, el de yuca a los 108 días. Lo anterior, considerando el período mínimo de fermentación y estabilización del material ensilado [28]. La suplementación de los animales se realizó durante la época de mínima precipitación del año, momento en el que disminuye la cantidad y calidad de pastos en esta región de Colombia. .

Área experimental y manejo animal

Los animales permanecieron en un área de 1 ha, establecida principalmente en un 85% en la pastura Agrosavia Sabanera (*Megathyrsus maximus* (Jacq.) B.K. Simon & S.W.L. Jacobs) y en un 15 % en Colosuana (*Bothriochloa pertusa* (L.) A. Camus). Esta área se dividió en 6 potreros de 0,16 ha cada uno, con el fin de establecer un sistema rotacional con 4 días de ocupación y 20 días de descanso. Las cercas perimetrales e internas de los potreros se establecieron con malla graduada en acero galvanizado para pastoreo con ovinos. De igual forma, en el módulo de rotación, se instaló un sistema de acueducto interno con hidrantes ubicados estratégicamente para el suministro constante de agua a los animales. Los ovinos pastorearon en horas de la mañana (08:00) y retornaron al aprisco en horas de la tarde (16:00). En el aprisco, los ovinos fueron separados en dos corrales provistos de bebederos y comederos plásticos lineales para el suministro del ensilaje.

Animales y tratamientos experimentales

El estudio se llevó a cabo entre los meses de enero a marzo del año 2023, correspondiente a la época de menos precipitación de la zona. El ensayo tuvo una duración de 52 días, de los cuales 10 días correspondieron al periodo de adaptación. Al inicio de este periodo, los ovinos se identificaron y pesaron. Posteriormente fueron desparasitados (Levamisol® HCL 15 %, 0,5 mg kg⁻¹) y distribuidos en los tratamientos respectivos. Se utilizaron 12 ovinos (*Ovis aries*) criollos de pelo una raza adaptada a las condiciones tropicales, caracterizada por su rusticidad y eficiencia en la producción de carne, con peso y edad promedio de 17,6 ± 3,2 kg y 8 meses, respectivamente, los cuales se distribuyeron aleatoriamente en dos tratamientos consistentes en: ovinos suplementados con ensilaje de maíz (D1EM) y ovinos suplementados con ensilaje de maíz y ensilaje del forraje de yuca (D2EM+EY), empleando una proporción 50:50. Los ovinos fueron suplementados (kg MS⁻¹) a razón del 1 % de su peso vivo.



Calidad nutricional de los forrajes

Se determinó la composición nutricional de la pastura y los ensilajes empleados en la alimentación de los ovinos. La calidad nutritiva del pasto Agrosavia Sabanera se determinó mediante la obtención de muestras compuestas, las cuales se colectaron a través del método de simulación de pastoreo (*hand plucking*). Se colectaron 500 g por muestra las cuales fueron secadas en estufa de ventilación forzada a 60 °C por 48 h. Posteriormente fueron molidas con un molino tipo Willey y enviadas al Laboratorio de Nutrición Animal de Agrosavia. Se determinó la concentración de proteína cruda (PC), fibra en detergente neutro (FDN), fibra en detergente ácido (FDA), digestibilidad de la materia seca (DISMS), energía metabolizable (EM), y nutrientes digestibles totales (NDT). De igual forma, se tomaron muestras de los ensilajes para su caracterización nutricional a través de espectroscopía de infrarrojo cercano (NIRS) [29]. La composición nutricional de los forrajes y dietas empleadas en la suplementación de los ovinos se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1. Composición nutricional de la pastura y ensilajes utilizados en el experimento.

Ítem	Pastura Agrosavia Sabanera n=4	Ensilaje de maíz D1EM n=12	Ensilaje de yuca (EY) n=12	D2 EM+EY n=1
Materia seca total (%)	31,25 ± 4,45	32,25 ± 0,22	27,67 ± 0,15	29,96
Proteína cruda (%)	11,59 ± 0,23	10,50 ± 0,73	18,08 ± 0,84	14,29
Extracto etéreo (%)	1,55 ± 0,05	1,79 ± 0,24	3,25 ± 0,20	2,52
Fibra Detergente Neutro (%)	68,26 ± 0,47	55,13 ± 3,98	38,21 ± 2,67	46,67
Fibra Detergente Ácido (%)	38,63 ± 1,00	24,95 ± 3,71	19,10 ± 2,04	22,03
Lignina (%)	8,60 ± 0,11	5,44 ± 0,88	3,79 ± 0,53	4,62
Hemicelulosa (%)	29,63 ± 0,52	30,19 ± 1,37	19,11 ± 1,02	24,65
Proteína Soluble (%)	39,94 ± 0,85	39,99 ± 1,75	36,88 ± 2,48	38,43
Proteína B (% PC)	53,36 ± 1,10	48,17 ± 2,42	47,83 ± 2,63	48,00
Proteína C (% PC)	5,14 ± 0,96	10,86 ± 0,72	13,15 ± 0,94	12,00
Almidón Total (%)	1,71 ± 0,16	14,74 ± 4,42	9,72 ± 0,61	12,23
Carbohidratos No Estructurales (%)	3,64 ± 0,52	16,65 ± 5,00	14,44 ± 1,30	15,54
Carbohidratos Solubles (%)	1,93 ± 0,37	1,91 ± 0,70	4,71 ± 0,84	3,31
Calcio (%)	0,53 ± 0,02	0,02 ± 0,03	0,99 ± 0,07	0,51
Fósforo (%)	0,25 ± 0,01	0,22 ± 0,02	0,26 ± 0,01	0,24
Nutrientes Digestibles Totales (%)	51,63 ± 0,46	70,41 ± 2,44	62,11 ± 1,09	66,26
Digestibilidad MS (%)	56,60 ± 0,49	76,85 ± 2,62	67,92 ± 1,18	72,39
Energía Metabolizable (Mcal.kg ⁻¹ MS)	1,83 ± 0,02	2,66 ± 0,11	2,29 ± 0,05	2,47

n: Corresponde al número de análisis. Fuente: Elaboración propia



Desempeño animal

Los animales se pesaron al inicio y cada 14 días hasta el final del ensayo, con báscula electrónica portátil (MDBM-300, Bogotá D.C.). A partir de esta información se determinó la ganancia de peso total (GDPT) y la ganancia diaria (GDP) mediante la siguiente ecuación.

$$\text{Ganancia diaria de peso (GDP)} = \frac{\text{Peso Final} - \text{Peso Inicial}}{\text{Número de días}}$$

Condición corporal

Para la evaluación de la condición corporal, se utilizó una escala de 1 a 5, teniendo en cuenta la metodología propuesta por Felice [30] al inicio y, posteriormente, cada 14 días, hasta el final del ensayo.

El consumo de ensilado se determinó por diferencia entre la cantidad de alimento suministrado y el sobrante.

Grado de anemia

Cada 14 días se realizó la inspección del color de la mucosa de la conjuntiva ocular de los ovinos, utilizando como referencia la carta guía Famacha®. Esta técnica se basa en la evaluación visual del color de la mucosa ocular, lo que permite determinar el grado de anemia, que puede ser causada por parásitos gastrointestinales, utilizando una escala de cinco colores: rojo (1); rojo pálido (2); rosado (3); rosado pálido o blanco rosado (4) y blanco (5) [31]. En esta escala, el grado 1 corresponde a ausencia de anemia y el grado 5 indica anemia grave.

Análisis económico

Para determinar la viabilidad económica de la suplementación con los distintos ensilajes, se empleó la metodología propuesta por Agreda [32], que contempla el registro de los costos directos, representados por el costo incurrido en la producción de los ensilajes y la mano de obra, mientras que los ingresos fueron dados por la comercialización de los kilogramos de carne en pie producidos en el periodo. A partir de ello, se determinó la utilidad neta, rentabilidad, relación beneficio-costos, punto de equilibrio y el costo de producción por unidad de producto. Los valores se presentan en dólares norteamericanos (USD) a una tasa representativa del mercado COP 4.345 [33].

Análisis estadístico

La información se colectó y almacenó en una hoja de cálculo para su posterior análisis. Debido al tamaño de muestra pequeño, $n < 20$ [34, 35], se utilizó una prueba T para medias independientes mediante el método de *bootstrapping* ($n = 10\,000$) con el objeto de obtener p-valores robustos ante situaciones de no normalidad y heterogeneidad de varianzas [36].

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Desempeño animal

No se detectaron diferencias ($p > 0,05$) entre las dietas con relación al consumo diario de ensilaje y condición corporal. No obstante, los ovinos suplementados con D2EM+EY obtuvieron una ganancia diaria y acumulada de peso significativamente mayor ($p < 0,05$), superando en un 25,5 % a los alimentados con la dieta D1EM. Asimismo, se registró efecto ($p < 0,05$) del tipo de ensilaje en la conversión alimenticia y en la coloración de la conjuntiva ocular con menor grado de anemia en animales suplementados con D2EM+EY (Tabla 1).

Tabla 2. Desempeño productivo de ovinos criollos de pelo suplementados con ensilaje de maíz y yuca.

Variable	D1EM	D2EM+EY
Peso inicial (kg)	17,93 ± 3,39	17,35 ± 3,29
Peso final (kg)	20,38 ± 3,17	20,68 ± 3,45
Días experimentales	42	42
Consumo de ensilaje diario (kg en base húmeda)	0,479 ± 0,02 a	0,474 ± 0,02 a
Ganancia peso periodo (kg)	2,45 ± 0,43 b	3,33 ± 0,58 a
Ganancia diaria de peso (kg)	0,060 ± 0,01 b	0,080 ± 0,01 a
Conversión alimenticia (kg)	8,27 ± a	6,01 ± b
Condición corporal (1-5)	3,0 a	3,0 a
Grado de anemia	2,0 a	1,0 b

El mejor desempeño de los animales suplementados (medida por la ganancia diaria de peso y por la conversión alimenticia) se obtuvo con el tratamiento D2EM+EY. Estos resultados pueden atribuirse a un mayor aporte de nutrientes por la dieta ofrecida (Tabla 2). Al respecto, varios autores aseguraron que al mejorar la relación energía-proteína de la dieta, se promueve una mayor actividad ruminal con lo cual se aumenta la degradabilidad de la materia orgánica ingerida y el aporte de nutrientes, favoreciendo así el desempeño productivo de los animales [3, 6, 2]. Dentro de la producción animal, la alimentación es uno de los factores de mayor importancia ya que esta incide directamente en el crecimiento y desarrollo de los animales, asimismo, en el margen de rentabilidad de los sistemas [37, 38, 39].

Resultados similares fueron encontrados por Baracaldo-Martínez et al. [40] al evaluar la GDP de ovinos en el departamento de Córdoba donde se reportaron ganancias entre 0,080 y 0,132 kg d⁻¹ para ovinos criollos en crecimiento. Dichos valores coinciden con los registrados en nuestro experimento al suplementar con ensilaje mixto de yuca y maíz. Sin embargo, siguen siendo inferiores a las ganancias de 0,120 kg d⁻¹ comunicados por Sánchez-Frómata et al. [11] al suministrar ensilaje de maíz más concentrado a los ovinos. Por otro lado, la GDP alcanzada en el presente estudio supera los 0,076 kg d⁻¹ descritos por Aguirre et al. [6] para ovinos Corriedale × Poll Dorset alimentados con ensilaje de maíz-alfalfa, así como las ganancias de 0,064 kg d⁻¹ reportados por Maza et al. [3] al emplear un balanceado alternativo.



El índice de conversión de alimento a partir del ensilaje fue menor ($p < 0,05$) en los animales suplementados con la dieta D2EM+EY, los cuales requirieron 6,0 kg de suplemento para producir un kilogramo de peso, mientras que, los animales suplementados con la dieta D1EM requirieron un 27,4 % más de suplemento para generar una unidad de producto. Dichos resultados pueden relacionarse con la naturaleza del suplemento, ya que la dieta D2EM+EY presentó un mayor contenido de proteína en el forraje y menor contenido de FDN y lignina en comparación con la dieta D1EM. Al respecto, Suárez-Paternina et al. [41] manifestaron que dietas con un menor contenido de FDN y carbohidratos estructurales presentan una mayor proporción de componentes solubles y altamente fermentables, lo cual favorece la degradación ruminal y tasa de pasaje de la materia orgánica ingerida.

La suplementación con D1EM y D2EM+EY no generó ($p > 0,05$) cambios en las reservas corporales de los ovinos, registrando una puntuación de 3 puntos en ambos grupos. Resultados similares entre ovinos suplementados con dietas energético-proteicas han sido reportados por Suárez-Paternina et al. [41]. En contraste, para el grado de anemia, los ovinos alimentados con D2EM+EY presentaron una valoración de 1 (mucosas color rojo) mucho mejor a la observada en la mucosa de los animales suplementados con D1EM. Al respecto, Torres-Acosta et al. [42] señalaron que la suplementación energético-proteica incrementó en los ovinos la resiliencia contra nematodos gastrointestinales, así como también mejoró el desempeño productivo de los animales.

Viabilidad económica de la suplementación con ensilajes

En la Tabla 2, se presenta el consumo de ensilaje en cada uno de los tratamientos durante el periodo experimental, lo cual representó el principal egreso dentro de los costos (Tabla 3). En este contexto, la suplementación de ovinos criollos con ensilaje de maíz y de yuca se considera rentable desde el punto de vista técnico y económico, debido a que los ingresos estimados de la comercialización en pie de los animales fueron superiores a los egresos. Sin embargo, los mayores retornos económicos fueron observados en los animales alimentados con la dieta D2EM+EY, debido a mayor ganancia de peso y menor costo en la alimentación de los animales. El margen de ingreso del periodo fue de USD 13,43 (Tabla 3) en los ovinos alimentados con la D2EM+EY, siendo superior en un 67,7 % al registrado por los ovinos alimentados con la dieta D1EM. De igual forma, se observó una mayor relación beneficio-costos en el tratamiento D2EM+EY, que fue de 2,4, indicando que por cada dólar invertido en el costo de la suplementación se pueden recuperar USD 0,00032. Por otra parte, al relacionarse los costos de producción con los kilogramos de carne producidos durante el periodo, se generó a un menor costo la unidad de producto, siendo 29,0 % menor al costo unitario registrado por el tratamiento D1EM. Finalmente, en la dieta D2EM+EY se destinó el 41,9 % de los kilogramos producidos para equilibrar el nivel de inversión.

Tabla 3. Costo de la suplementación (USD) con ensilajes para ovinos durante el periodo experimental.

ítem	D1EM	D2EM+EY
Costo alimento/kg	0,043	0,037
Costo suplementación periodo	6,47	5,55
Mano de obra	12,99	12,99
Total costos	19,46	18,54
Ganancia de peso periodo (kg)	14,88	19,98
Costo comercial kg en pie	1,60	1,60
Ingreso Neto Total	23,81	31,97
Ingreso Neto Periodo	4,35	13,43
Relación B/C	0,7	2,4
Rentabilidad periodo (%)	22,24	72,30
Punto de equilibrio (kg)	12,2	11,6
Costo de producción kg en pie	1,31	0,93

Los indicadores económicos registrados en el tratamiento D2EM+EY demostraron ser competitivos frente a experiencias en la región Caribe colombiana que han reportado costos de producción de kg de peso vivo entre USD 0,90 y USD 1,20 [9]. Asimismo, nuestros resultados, tanto en la suplementación con ensilaje de maíz como la mixta (maíz-yuca), registraron mayor rentabilidad que la presentada por Sánchez-Frómeta et al. [11] de 12,2 % al suplementar ovinos con ensilaje de maíz más concentrado.

Durante la estación seca del año, la escasez en la oferta y la calidad del forraje compromete la rentabilidad del sistema ovino. Sin suplementación, los indicadores económicos de la producción resultan negativos, con bajos márgenes de rentabilidad que oscilan del 0,4 al 4,2 % [43]. Frente a este panorama, nuestros resultados muestran que la suplementación con ensilaje de maíz-yuca constituye una alternativa técnica y económicamente viable para sostener el desempeño productivo del ovino criollo, aún frente a sequías cada vez más intensificadas por la variabilidad y el cambio climático.

CONCLUSIONES

La suplementación estratégica con ensilaje de maíz y de yuca incrementó las ganancias de peso y mantuvo la condición corporal de los animales durante el período de sequía. Esta alternativa alimenticia se presenta como una opción rentable y ambientalmente sostenible, dado que minimiza la dependencia de insumos externos en las fincas y promueve el uso de recursos forrajeros adaptados y de fácil implementación por parte de pequeños y medianos productores.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA) y al Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural por apoyar y financiar el desarrollo



del proyecto “Plan de vinculación para variedades de maíz” con diferentes mercados potenciales para uso de pequeños y medianos productores, que permitió la elaboración del presente artículo.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

Definición y montaje del diseño en laboratorio: Emiro Suárez, Yacerney Paternina y José Jaime Tapia.

Colecta de información y preparación de bases de datos: Emiro Suárez, Yacerney Paternina y Lorena Mestra.

Análisis estadístico de la información: Wilson Barragán, Emiro Suárez, Liliana Atencio y José Jaime.

Todos los autores participaron activamente en la recopilación de información, la redacción y la revisión final del manuscrito.

CONFLICTOS DE INTERESES

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses en el presente trabajo.

REFERENCIAS

- [1] Barros e Silva, T. M., García Leal de Araújo, G., Vinhas Voltolini, T., Ávila Queiroz, M. A., Yamamoto, S. M., Nunes Lista, F., Costa Gois, G., Alves de Moraes, S., Sena Campos, F., Rocha Santos, M. C. (2022). Productive performance of sheep fed buffel grass silage in replacement of corn silage. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 13(2), 408-421. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v13i2.5381>
- [2] Suárez Paternina, E., Maza Ángulo, L., Barragán Hernández, W., Aguayo Ulloa, L., & Vergara Garay, O. (2022). Características de la canal y perfil de ácidos grasos de la carne de corderos criollos suplementados con semilla de algodón y maíz. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 13(1), 97-114. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v13i1.5342>
- [3] Maza Angulo, L., Bustamante Yanez, M., Simanca Sotelo, J. C., Ruiz Ortiz, M., Montaña Flórez, G., Vergara Garay, O. (2015). Efecto de la suplementación sobre la ganancia de peso y rendimiento en canal de corderos Sudán. *Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica*, 18(1), 283-286. <https://doi.org/10.31910/rudca.v18.n1.2015.448>
- [4] Gruber, T., Fliegerová, K., Terler, G., Resch, R., Zebeli, Q., & Hartinger, T. (2024). Mixed ensiling of drought-impaired grass with agro-industrial by-products and silage additives improves the nutritive value and shapes the microbial community of silages. *Grass and Forage Science*, 79(2), 179-197. <https://doi.org/10.1111/gfs.12669>
- [5] Mejía Kerguelén, S. L., Suárez Paternina, E. A., Tapia Coronado, J. J., & Atención Solano, L. M. (2020). *Sorgo dulce forrajero Corpoica J17-18 (Sorghum bicolor): alternativa forrajera para la alimentación de bovinos en la región Caribe*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA). <https://doi.org/10.21930/agrosavia.brochure.7404005>
- [6] Aguirre, L., Cevallos, Y., Herrera, R., & Escudero, G. (2016). Utilización de ensilaje de maíz y alfalfa en la alimentación de ovinos mestizos en pastoreo. *Ciencias Veterinarias y Agropecuarias*, 6(1), 76-82. <https://revistas.unl.edu.ec/index.php/cedamaz/article/view/64>
- [7] Suárez-Paternina, E., Maza-Angulo, L., Aguayo-Ulloa, L., Vergara-Garay, O., Barragán-Hernández, W., & Bustamante-Yáñez, M. (2020). Efecto de la suplementación con semilla de algodón y maíz en el desempeño productivo y calidad de la carne de ovinos. *Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica*, 23(2). <http://doi.org/10.31910/rudca.v23.n2.2020.1604>
- [8] Mestra-Vargas, L.I., Santana-Rodríguez, M.O. & Aguayo-Ulloa, L.A. (2022). Respuesta productiva de corderos suplementados con oleaginosas en condiciones de Caribe Húmedo colombiano. *Nutrición animal tropical*, 16(1), 1-30. <https://archivo.revistas.ucr.ac.cr/index.php/nutritional/article/view/50178>
- [9] Mestra-Vargas, L. I., Martínez-Reina, A. M., & Santana-Rodríguez, M. O. (2019). Caracterización técnica y económica de la producción de carne ovina en Córdoba, Colombia. *Agronomía Mesoamericana*, 30(3), 871-884. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=43760145017>
- [10] Muñoz-Osorio, G. A., Aguilar-Caballero, A. J., Sarmiento-Franco, L. A., Wurzingger, M., & Cámara-Sarmiento, R. (2016). Technologies and strategies for improving hair lamb fattening systems in tropical regions: a review. *Ecosistemas y recursos agropecuarios*, 3(8), 267-277. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-90282016000200267&script=sci_arttext&tlang=en
- [11] Sánchez-Frómata, C., Curbelo-Rodríguez, L. M., Pérez-Peréz, A., Albornoz-Rodríguez, O., & Hernández-Viera, W. (2023). Comportamiento de algunos indicadores productivos y económicos de corderos Pelibuey con ensilaje de maíz (*Zea mays* L.). *Revista de Producción Animal*, 35(1), 41-50. <https://www.redalyc.org/journal/7624/762478459006/html/>
- [12] Salcedo, É., Gómez, W. R., Arreaza, L. C., Rivero, E. T. (2014). *Cultivos forrajeros para conservación y alimentación bovina en el sur del departamento del Atlántico*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA). <https://www.sidalc.net/search/Record/dig-bac-20.500.12324-1927/Description>
- [13] Pereira da Silva, T.G., Guim, A., de Lima Costa 1, C.R., da Silva Memdes, C.H., Auto Lopes, L., Oliveira Cavalcante, E., dos Santos Nascimento, J.C., Leal Viana, B. (2019). Concentração de ácido cianídrico na maniçoba in natura e conservada. *Revista Agrária Acadêmica*, 2(4), 119-124. <https://doi.org/10.32406/V2N42019/119-124/AGRARIACAD>
- [14] Suárez-Paternina, E. A., Mestra-Vargas, L. I., Paternina-Paternina, Y., Salcedo-Carrascal, E., Luna-Castellanos, L. L., & Araújo-Vásquez, H. (2022). *Yuca para la alimentación animal en la región Caribe: manejo, conservación y uso eficiente*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria Agrosavia. <https://doi.org/10.21930/agrosavia.manual.7405651>

- [15] da Costa Ribeiro Barboza, S., de Oliveira, J. S., de Carvalho Souza, M. T., de Lima Júnior, D. M., Lima, H. B., & Guerra, R. R. (2019). Ovinos submitted to diets containing cassava foliage hay and spineless cactus forage: histological changes in the digestive and renal systems. *Tropical Animal Health and Production*, 51, 1689-1697. <https://doi.org/10.1007/s11250-019-01863-9>
- [16] Ceballos, H., de la Cruz, G., & Gabriel, A. (2012). Cassava taxonomy and morphology. *Cassava in the third millennium: modern production, processing, use, and marketing systems*. Centro Internacional de Agricultura Tropical, 15-28.
- [17] Abdel-Fattah, A. F., Saleem, A. K., & Ibrahim, M. Y. (2022). Impact of different feeding strategies on welfare, milk yield and productive performance in egyptian dairy sheep and goat. *International Journal of Veterinary Sciences and Animal Husbandry*, 7(2), 40-48. <https://doi.org/10.22271/veterinary.2022.v7.i2a.414>
- [18] Basso, F. C., Rabelo, C. H., Lara, E. C., Siqueira, G. R., & Reis, R. A. (2018). Effects of Lactobacillus buchneri NCIMB 40788 and forage: Concentrate ratio on the growth performance of finishing feedlot lambs fed maize silage. *Animal Feed Science and Technology*, 244, 104-115. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0377840118300312>
- [19] Khan, N., Yu, P., Ali, M., Cone, J., & Hendriks, W. (2014). Nutritive value of maize silage in relation to dairy cow performance and milk quality. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 95(2), 238-252. <https://doi.org/10.1002/jsfa.6703>
- [20] Khejournart, P., Meenongyai, W., & Juntanam, T. (2022). Cassava pulp added to fermented total mixed rations increased tropical sheep's nutrient utilization, rumen ecology, and microbial protein synthesis. *Journal of Advanced Veterinary and Animal Research*, 9(4), 754-760. <https://doi.org/10.5455/javar.2022.i645>
- [21] Oliveira, A. P. D., Bagaldo, A. R., Loures, D. R. S., Bezerra, L. R., Moraes, S. A., Yamamoto, S. M., Araujo, FL., Cirne, L.G. & Oliveira, R. L. (2018). Effect of ensiling gliricidia with cassava on silage quality, growth performance, digestibility, ingestive behavior and carcass traits in lambs. *Animal Feed Science and Technology*, 241, 198-209. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2018.05.004>
- [22] Rabelo, C. H. S., Lara, E. C., Basso, F. C., Härter, C. J., & Reis, R. A. (2018). Growth performance of finishing feedlot lambs fed maize silage inoculated with Bacillus subtilis and lactic acid bacteria. *The Journal of Agricultural Science*, 156(6), 839-847. <https://doi.org/10.1017/s0021859618000679>
- [23] Souza, C. M., Oliveira, R. L., Voltolini, T. V., Menezes, D. R., Dos Santos, N. J. A., Barbosa, A. M., Silva, TM., Pereira, E.S. & Bezerra, L. R. (2018). Lambs fed cassava silage with added tamarind residue: Silage quality, intake, digestibility, nitrogen balance, growth performance and carcass quality. *Animal Feed Science and Technology*, 235, 50-59. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2017.11.007>
- [24] Suárez, E., Paternina, Y., Atencio, L., Tapia, J., Mejía, S., & Maza, L. (22 de Noviembre de 2023). *Desempeño productivo de corderos criollos suplementados con forrajes energético-proteicos*. [Presentación]. Primer congreso Latinoamericano One Health, Montería, Colombia.
- [25] Tapia Coronado, J. J., Atencio Solano, L. M., Ramirez Duran, J., Osorio Guerrero, K. V., Castillo Sierra, J., & Mejía Kerguelén, S. (2022). Situación actual y avances tecnológicos para mejorar la productividad del cultivo de maíz en Colombia. *ACI Avances en Ciencias e Ingenierías*, 14(1). <https://doi.org/10.18272/aci.v14i1.2585>
- [26] Mejía Kerguelén, S. L., Pérez Cantero, S., Suárez Paternina, E. A., Atencio Solano, L. M., & Tapia Coronado, J. J. (2020) *Corpoica SM 1511-6 y Corpoica SM2081-34: variedades de yuca de alta producción de forraje y valor proteico*. Bogotá, p 8. <https://doi.org/10.21930/agrosavia.folded138>
- [27] Mejía-Kerguelén, S., Cuadrado-Capella, H., Rivero-Espitia, T. (2013). *Manejo agronómico de algunos cultivos forrajeros y técnicas para su conservación en la región Caribe Colombiana*. 2 ed. (CORPOICA), 77 p. <http://hdl.handle.net/20.500.12324/13440>
- [28] Xin, Y., Chen, C., Zhong, Y., Bu, X., Huang, S., Tahir, M., Du, D., Liu, W., Yang, W., Li, J., Wu, Y., Ahang, Z., Lian, Z., Xiao, Q. & Yan, Y. (2023). Effect of storage time on the silage quality and microbial community of mixed maize and faba bean in the Qinghai-Tibet Plateau. *Frontiers in Microbiology*, 13. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.1090401>
- [29] Ariza-Nieto, C., Mayorga, O. L., Mojica, B., Parra, D., & Afanador-Tellez, G. (2018). Use of LOCAL algorithm with near infrared spectroscopy in forage resources for grazing systems in Colombia. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 26(1), 44-52. <https://doi.org/10.1177/0967033517746900>
- [30] Felice, M. (2013). *Condición corporal de ovinos*. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA).



- [31] Batch, G., Hansen, J.W., Krecek, R.C., Van Wyk, J.A. & Vatta, A. (2001). *Sustainable approaches for managing haemonchosis in sheep and goats*. Food and Agriculture Organization of the United Nations (p. 90). FAO. https://www.researchgate.net/publication/288266753_Sustainable_approaches_for_managing_haemonchosis_in_sheep_and_goats
- [32] Agreda, V. (1990). *Metodología para Análisis económico de sistemas de producción*. Rispal. San José de Costa Rica.
- [33] Banco de la República de Colombia. (2025, Marzo 31). *Tasa de cambio del peso colombiano*. Banco de la República de Colombia. <https://suameca.banrep.gov.co/estadisticas-economicas/#/informacionSerie/1/Tasa%20de%20cambio%20del%20peso%20colombiano/Tasa%20de%20Representativa%20del%20Mercado%20%28TCRM%29>
- [34] Ko, M. J., & Lim, C. Y. (2021). General considerations for sample size estimation in animal study. *Korean Journal of Anesthesiology*, 74(1), 23-29. <https://doi.org/10.4097/kja.20662>
- [35] Rost, D. H. (1991). Effect strength vs. statistical significance: a warning against the danger of small samples: a comment on Gefferth and Herskovits's article "Leisure activities as predictors of giftedness". *European Journal of High Ability*, 2(2), 236-243. <https://doi.org/10.1080/0937445910020212>
- [36] Johnston, M. G., & Faulkner, C. (2021). A bootstrap approach is a superior statistical method for the comparison of non-normal data with differing variances. *The New Phytologist*, 230(1), 23-26. <https://www.jstor.org/stable/27001227>
- [37] Rodríguez-Castillo, J., Moreno-Medina, S., Hernández-Hernández, J., Robles-Robles, M., Rodríguez-Castañeda, E. (2017). El indicador CASI en la rentabilidad ovina. *Revista Mexicana de Agronegocios*, 41,764-777. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=14153918010>
- [38] Lins Lima, N.L., de Freitas Ribeiro, C.R., Menezes de Sá, H.C., Leopoldino Júnior, I., Lima Cavalcanti, L.F. Valadares Santana, R.A., Furusho-Garcia, I.F., Garcia Pereira, I. (2017). Economic analysis, performance, and feed efficiency in feedlot lambs. *Revista Brasileira de Zootecnia*.46(10). <https://doi.org/10.1590/S1806-92902017001000005>
- [39] Paternina-Acosta, C., Ruiz-Meza, J., & Hernández-Mendo, O.H. (2021). Análisis y reducción de costos alimenticios asociados a la producción láctea de un sistema bovino semiespecializado, mediante el uso de la metodología AHP. *Revista CTA Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 22(2). https://doi.org/10.21930/rcta.vol22_num2_art:1699
- [40] Baracaldo-Martínez, R. A., Torres-Cruz, M. Z., & Grajales-Lombana, H. A. (2022). Estructura poblacional e indicadores de desempeño en sistemas de producción de ovinos en Colombia. *Revista MVZ Córdoba*, 27(s). https://www.researchgate.net/publication/363508700_Estructura_poblacional_e_indicadores_de_desempeno_en_sistemas_de_produccion_de_ovinos_en_Colombia
- [41] Suárez-Paternina, E. A.; Maza-Angulo, L. A.; Barragán-Hernández, W.; Patiño-Pardo, R.; Bustamante-Yañez, M. de J. & Vergara-Garay, O. (2018). Efecto de la suplementación con semilla de algodón y maíz molido sobre el consumo y el desempeño productivo de ovinos de pelo colombiano. *Revista MVZ Córdoba*, 23. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-42262020000200024
- [42] Torres-Acosta, F., Sandoval-Castro, C.A., González-Pech, P.G., Mancilla-Montelongo G., Ortega, A., Aguilar-Caballero, A., Santos-Ricalde, R., Sarmiento-Franco, L.A., Ramos-Bruno, E., Torres-Fajardo, R.A., Méndez, A. (2021). Interacción entre la nutrición y los nematodos gastrointestinales en pequeños rumiantes pastoreando la selva baja caducifolia. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 24,1-18.
- [43] Suárez-Paternina, E. A., Maza-Angulo, L. A., & Bustamante-Yañez, M. (2017). Suplementación energético-proteica sobre el desempeño productivo y características fisicoquímicas de la carne de ovinos criollos (*Ovis aries*) en pastoreo. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, 30, 182.

Validación del método empírico para la obtención de densidad de madera de especies altoandinas

Alberto Macancela-Herrera^{1*}, Pedro X. Astudillo², Byron Ortega-Pillajo¹

¹ Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador

² Laboratorio de Ecología-Escuela de Biología, Universidad del Azuay, Cuenca, Ecuador

* Autor para correspondencia/ corresponding author, e-mail: alberto.macancelah@ucuenca.edu.ec

Validation of the empirical method for obtaining wood density of high Andean species

Resumen

Las emisiones de gases de efecto invernadero, incluyendo el dióxido de carbono (CO₂), han aumentado de forma constante en la atmósfera durante los últimos 20 años. Este gas es considerado uno de los principales responsables del calentamiento global. Se conoce que el CO₂ es absorbido por la vegetación, por lo que es uno de los principales sumideros de carbono. En este contexto, la densidad de madera es un indicador de la cantidad de carbono que la vegetación toma de la atmósfera. Por ello, se han desarrollado distintas metodologías para estimar este parámetro en la madera. Actualmente, se pretende hacer uso de metodologías no invasivas que causen el menor daño posible a las plantas que no requieran herramientas o equipos costosos y que, además, permitan ahorrar tiempo al momento de medir la densidad de madera. Por este motivo, el presente estudio tuvo dos objetivos. El primero, comparar la densidad de madera obtenida a través del método empírico y el método por desplazamiento de agua; y el segundo, demostrar la validez del método empírico como metodología para la medición de densidad de madera para especies altoandinas. Para realizar los análisis estadísticos, las especies fueron agrupadas según su hábito de crecimiento (arbóreas y arbustivas). De igual manera, se analizaron en conjunto los dos hábitos de crecimiento. La comparación de medias de las metodologías estudiadas demostró que las densidades de madera no muestran diferencias estadísticas (p valor > 0.05). Adicionalmente, los resultados de la regresión lineal mostraron ajustes por encima del 85 % para especies arbóreas, arbustivas y agrupadas, lo cual demuestra la alta similaridad en los valores de la densidad de madera obtenida a través de las dos metodologías. Los resultados obtenidos concuerdan con investigaciones reportadas para otras latitudes, por lo que se sugiere el uso del método empírico para medir la densidad de madera en especies altoandinas.

Palabras clave: dendrometría, carbono, bosques andinos, sumidero, especies nativas.

Abstract

Greenhouse gas emissions, including carbon dioxide (CO₂), have steadily increased in the atmosphere over the past 20 years. This gas is considered one of the main causes of global warming. CO₂ is known to be absorbed by vegetation, making it one of the main carbon sinks. In this context, wood density is an indicator of the amount of carbon that vegetation absorbs from the atmosphere. Therefore, different methodologies have been



Licencia Creative Commons
Atribución-NoComercial 4.0



Editado por /
Edited by:
Eva O.L. Lantsoght

Recibido /
Received:
16/01/2025

Aceptado /
Accepted:
05/05/2025

Publicado en línea /
Published online:
21/10/2025



developed to estimate this parameter in wood. Currently, the goal is to use non-invasive methodologies that cause the least possible damage to plants, do not require expensive equipment, and also save time when measuring wood density. For this reason, this study aimed to compare wood density obtained through the empirical method and the water displacement method and demonstrate the validity of the empirical method as a methodology for measuring wood density for high Andean species. To perform the statistical analyses, species were grouped according to their growth habit (tree and shrub). Similarly, both growth habits were analyzed together. Comparison of means across the studied methodologies showed no statistical differences in wood densities (p value > 0.05). Additionally, the linear regression results showed fits above 85 % for tree, shrub, and grouped species, demonstrating the high similarity in wood density values obtained using the two methodologies. The results obtained are consistent with research reported for other latitudes, and therefore the use of an empirical method is suggested to measure wood density in high Andean species.

Keywords: dendrometry, carbon, andean forest, sink, native species.

INTRODUCCIÓN

El dióxido de carbono atmosférico (CO_2) es uno de los principales gases responsables del calentamiento global [1]. Las emisiones de este gas han registrado un aumento desde 2004 hasta 2024 de un 11.4 % [2]. Si el aumento de carbono es excesivo, es necesario tomar medidas apropiadas para desacelerarlo, puesto que los efectos negativos no solo se manifestarán en el clima [3], sino también en el mal funcionamiento de los ecosistemas, como ya se ha demostrado en años anteriores [4]. Además, se ha demostrado que la vegetación tiene la capacidad de absorber carbono a través de la fotosíntesis, lo que le permite mayor generación de biomasa [5, 6, 7] y contribuye a estabilizar el ciclo del carbono [8]. En consecuencia, la densidad de la madera es un parámetro que permite estimar cuánto carbono absorbe la vegetación [9, 10].

La densidad de madera es considerada un indicador de importancia ecológica [11], debido a que su caracterización permite conocer la calidad de madera y la capacidad de almacenamiento de carbono [12, 13, 14]. Sin embargo, la calidad depende de los tejidos y células de las que se encuentre constituida [15], y varía en función de la especie [16]. Además, se conoce que el clima en el cual habita la vegetación leñosa puede influir en características de la dureza y peso de la madera [17, 18]. Por ejemplo, en los trópicos se ha registrado que, por las condiciones de precipitación y temperatura, la vegetación leñosa desarrolla mayor densidad de madera en comparación con otras regiones del planeta [19].

Las metodologías para estudiar la densidad de madera en las que se destruye por completo el árbol o arbusto han sido ampliamente aplicadas (i.e., al cortar el tronco en forma de anillos) [20]. Sin embargo, los métodos que permiten obtener la densidad de madera mediante técnicas no destructivas, rápidas, precisas y económicas son limitadas [21, 22]. Investigaciones recientes aplican metodologías no invasivas como son rayos X con densitómetro y difractómetro [23], así como otras estiman la densidad de madera a partir de imágenes 3D; no obstante, estas técnicas requieren de instrumentación especial y sus costos son elevados [24, 25].

Métodos no destructivos como el empírico y por desplazamiento de agua, permiten obtener la densidad de madera a través de una muestra de madera con el uso de barrenas forestales. En el primero, método empírico o geométrico, la densidad se obtiene al considerar a la muestra como un cilindro y aplicar la relación entre el peso y volumen [26, 27]. El segundo, método por desplazamiento de agua, también calcula la densidad de madera a través de la relación entre el peso y volumen de agua desplazada de la muestra de madera. Este último es un método muy utilizado, aunque requiere mayor tiempo para calcular la densidad de madera y su costo puede ser mayor al hacer uso de otros equipos en relación con el método empírico [27, 28].

En consecuencia, es fundamental recopilar información precisa sobre la densidad de la madera mediante metodologías accesibles, tanto en términos de tiempo como de costos, y que, además, sean menos invasivas. Esto es importante debido al incremento de los censos forestales y a que numerosas especies se encuentran catalogadas en alguna categoría de amenaza de extinción [29]. Hasta la fecha, existen pocos estudios que demuestren la efectividad del método empírico, el cual ha sido probado en especies de otras regiones del trópico, como en Kenia [26], pero no en especies altoandinas. Por esta razón, el presente estudio tiene como objetivos: i) comparar la densidad de madera obtenida a través del método empírico y método por desplazamiento de agua, y ii) demostrar la validez del método empírico como metodología para la medición de densidad de madera en especies altoandinas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

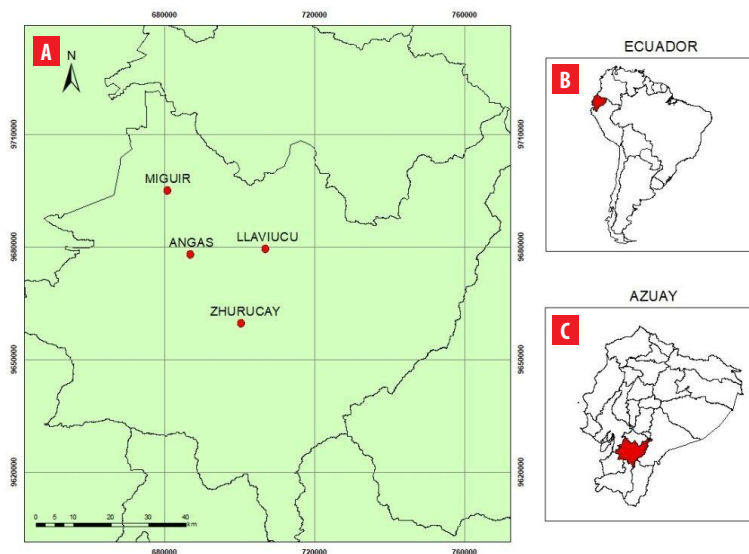


FIGURA 1. Mapa del área de estudio: **A)** Ubicación de los cuatro sitios para el monitoreo de densidad de madera en bosques altoandinos de los Andes occidentales, **B)** ubicación de Ecuador dentro de Sudamérica y **C)** Ubicación de la provincia del Azuay en el Ecuador.



El estudio se desarrolló en cuatro bosques altoandinos de los Andes occidentales de la provincia del Azuay, Ecuador como lo muestra la Figura 1. Entre los meses de febrero y mayo de 2019 se monitorearon las localidades de: Llaviucu (2°50'38"S 79°06'59"O - 3200 m s. n. m.), Zhurucay (3°08'4"OS 79°15'07"O - 3400 m s. n. m.), Angas (2°55'59"S 79°21'00"O - 3500 m s. n. m.) y Migüir (2°46'55"S 79°16'12"O - 3500 m s. n. m.). Estos bosques se caracterizan por la presencia de niebla [30], así como por altas tasas de riqueza y endemismo, con predominio de especies de hábito arbóreo y arbustivo [31]. El presente estudio se diferencia de otros debido a que los sitios de estudio, por las características de flora y su extensión, la cantidad de carbono absorbido puede llegar a ser mayor a otros.

Colección y procesamiento de muestras

Se seleccionaron nueve especies leñosas de mayor abundancia que se encuentran compartidas en los cuatro sitios de estudio. La Tabla 1 indica las especies consideradas para el estudio: cinco fueron especies de hábito de crecimiento arbóreas y cuatro especies de hábito de crecimiento arbustivas. Por especie se seleccionaron 20 individuos (cinco en cada sitio), lo que da como resultado 180 muestras. Sólo se consideraron plantas con diámetro a la altura del pecho (DAP) mayor a 5 cm, con la finalidad de que permita la extracción de una muestra de madera válida [32, 33].

Todas las muestras de madera fueron obtenidas a la altura del DAP con la ayuda de barrenas forestales, instrumentos con punta enroscada que permiten extraer un núcleo de madera de un tronco leñoso. Se emplearon barrenas de la marca Haglöf 16" y Jim Gem 10" [34]. Posteriormente, cada muestra extraída se cubrió con papel aluminio para evitar su deshidratación y se almacenó en bolsas humedecidas. En el laboratorio, las muestras se secaron en estufa a 60° C durante 72 horas y, finalmente, se se pesaron.

Tabla 1. Lista de especies monitoreadas para estimar la densidad de madera en bosques altoandinos de los Andes occidentales.

Especies	n	Familia	Hábito de crecimiento
<i>Alnus acuminata</i> Kunth	20	Betulaceae	Árbol
<i>Brugmansia sanguinea</i> (Ruiz & Pav.) D. Don	20	Solanaceae	Arbusto
<i>Escallonia myrtilloides</i> L.f.	20	Escalloniaceae	Árbol
<i>Hedyosmum luteynii</i> Todzia.	20	Chloranthaceae	Árbol
<i>Morella pubescens</i> Benth.	20	Myricaceae	Arbusto
<i>Myrcianthes rhopaloides</i> (Kunth) McVaugh	20	Myrtaceae	Árbol
<i>Oreocallis grandiflora</i> (Lam.) R.Br.	20	Proteaceae	Arbusto
<i>Vallea stipularis</i> L.f.	20	Elaeocarpaceae	Arbusto
<i>Weinmannia fagaroides</i> Kunth	20	Cononiaceae	Árbol

n: número de individuos de los que se recolectó la muestra de madera.



Estimación de la densidad de madera

Método empírico o geométrico

Para este método se considera la muestra de madera como un cilindro [26], la ecuación 1 la describe a continuación:

$$v = \frac{4}{\pi d^2} l \quad (1)$$

En donde, v es el volumen del cilindro, l es la longitud de la muestra y, r es el radio de la muestra.

Método por desplazamiento de agua

Se registra el peso que se obtiene al sumergir la muestra de madera dentro de un tubo de ensayo con agua destilada, para esto, es necesario una balanza analítica (precisión = 0.0001g). A continuación, se despeja el volumen (v) de la ecuación 2, en donde p es el peso que se acaba de obtener y d , la densidad del agua destilada ($1\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$). Finalmente, para ambos métodos, se divide el peso para el volumen, como lo indica la ecuación 2. Sin embargo, p será el peso de la muestra de madera secada a 60°C por 72 horas y V es el volumen obtenido anteriormente [35].

$$d = \frac{p}{v} \quad (2)$$

Análisis estadístico

Para describir los métodos, se calcularon medidas de tendencia central y de dispersión por hábito de crecimiento y para todas las especies. Para comparar la densidad de madera obtenida a través del método empírico y el método por desplazamiento de agua para cada hábito de crecimiento (arbóreo y arbustivo) se hizo uso de pruebas de *t-student* pareadas con un umbral $\alpha < 0.05$. Para validar el método empírico a partir del método por desplazamiento de agua, se generaron regresiones lineales, y, además, se evaluaron métricas de ajustes de estas [26, 33]. Las mismas pruebas estadísticas se realizaron al agrupar los datos de densidad de madera de los dos hábitos de crecimiento. Los análisis estadísticos y gráficas se llevaron a cabo en el programa estadístico R [36].

RESULTADOS

Acorde a la Tabla 2, la media y desviación estándar (DE) de la densidad de madera por el método empírico y por el método por desplazamiento de agua fueron muy similares entre sí (empírico = $0.52\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3} \pm \text{DE} = 0.1$; desplazamiento = $0.53\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3} \pm \text{DE} = 0.14$), aunque en razón del coeficiente de varianza (CV), los datos apenas se dispersan en los dos métodos $\sim 4\%$. Un comportamiento muy similar se evidenció para la densidad de madera de especies arbustiva, aunque la media en los dos métodos son las mismas y se comprobó menor dispersión de los datos (empírico = $0.49\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3} \pm \text{DE} = 0.12$; desplazamiento = $0.49\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3} \pm \text{DE} = 0.12$).

Tabla 2. Comparación de la estimación de la densidad de madera entre el método empírico y el método por desplazamiento de agua para hábitos de crecimiento arbóreo, arbustivo y datos agrupados.

Hábito	Método	Media	Mediana	DE	CV	Mínimo	Máximo
Árbol	Desplazamiento	0.52	0.48	0.14	0.038	0.27	0.99
	Empírico	0.53	0.48	0.15	0.045	0.27	0.97
Arbusto	Desplazamiento	0.49	0.52	0.12	0.029	0.24	0.76
	Empírico	0.49	0.52	0.12	0.030	0.23	0.76
Agrupado	Desplazamiento	0.51	0.50	0.14	0.039	0.24	0.99
	Empírico	0.51	0.50	0.14	0.039	0.23	0.97

DE: desviación estándar. CV: coeficiente de variación.

La comparación de medias para especies arbóreas entre las dos metodologías (Figura 2a) demostró que no se diferencian estadísticamente (p valor > 0.05), puesto que sus medias fueron similares (0.52 g.cm^{-3} desplazamiento y 0.53 g.cm^{-3} empírico). Asimismo, se comprobó que tampoco difieren significativamente (p valor > 0.05) las medias de las densidades de madera para especies arbustivas, incluso sus medias son las mismas (desplazamiento y empírico: 0.49 g.cm^{-3}), según se puede observar en la Figura 2b. La Figura 2c confirma que, al evaluar los datos en conjunto, los resultados obtenidos son muy similares al analizar por hábito de crecimiento, incluso la desviación estándar por grupo es muy similar. Estos resultados sugieren que los valores de las dos metodologías, al ser idénticos, pueden ser aplicadas en la vegetación altoandina.

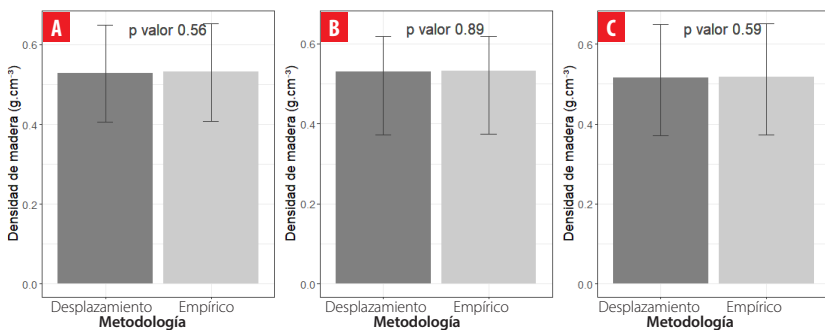


FIGURA 2. Comparación de medias de la estimación de madera entre el método empírico y método por desplazamiento de agua para hábitos de crecimiento. a) hábito arbóreo, b) hábito arbustivo, c) datos en conjunto.

Relación entre el método empírico y método por desplazamiento de agua

Las regresiones lineales obtenidas muestran ajustes altos y valores de la raíz del error cuadrático medio (RECM) bajos. La Figura 3a confirma que la estimación de la densidad de madera del método por desplazamiento de agua para especies arbóreas aumenta significativamente mientras aumenta la densidad estimada por el método empírico, este mismo patrón ocurre con especies de hábito arbustivo (Figura 3b). Finalmente, al agrupar todos los dos hábitos de crecimiento, se observan ajustes muy similares a los anteriores. Esto se puede observar en la Figura 3c.

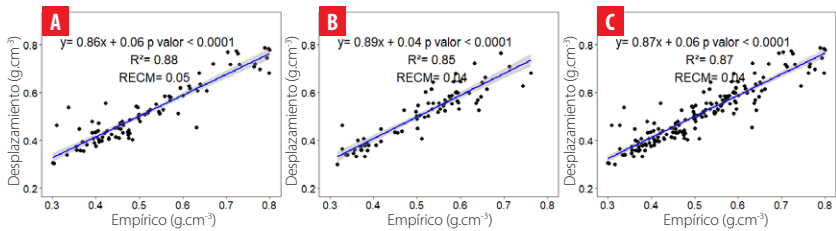


FIGURA 3. Gráfica de dispersión con línea de tendencia de la densidad de madera del método por desplazamiento de agua con el método empírico. a) Hábito arbóreo, b) Hábito arbustivo. c) Datos en conjunto.

DISCUSIÓN

Los resultados de este estudio coinciden con los de otras investigaciones al reconocer el uso del método empírico como metodología válida para estimar la densidad de madera, sin embargo, anteriormente solamente se había validado con especies de otras latitudes y no altoandinas. Los hallazgos en este estudio han demostrado que no existen diferencias estadísticas entre los valores de la densidad de madera tanto para especies arbóreas como arbustivas. Asimismo, se ha demostrado que el ajuste entre los dos métodos es alto, lo cual sugiere que se puede hacer uso del método empírico para obtener densidad de madera.

En un estudio previo [25] al comparar un método no destructivo (método empírico) con un destructivo (corte de disco) no se hallaron diferencias significativas de la densidad de madera entre las dos metodologías, pero cuando se analizaron las densidades de madera por hábito de crecimiento, se obtuvieron resultados contrarios. En el presente estudio, la misma tendencia se halló al no encontrar diferencias estadísticas entre el método empírico y por desplazamiento de agua cuando se analizó sin agrupamiento, pero tampoco se obtuvieron diferencias cuando se evaluó por hábito de crecimiento. Esto se debe a la alta similitud de la densidad de madera obtenida por el método empírico con otras metodologías. Esta característica del método ya se ha resaltado en investigaciones anteriores [26, 37, 38].

Por otra parte, se ha demostrado que la densidad de madera obtenida a través del método empírico en especies del género *Pinus* tienen el mismo comportamiento con metodologías que hacen uso de equipos costosos [39]. En el estudio actual, las tres regresiones lineales realizadas entre las dos metodologías mostraron ajustes por encima del 85 % de variabilidad (Figura 3). Esto nos permite inferir que el método empírico puede ser aplicado a especies altoandinas como de zonas templadas.

Una especie de la familia Fabaceae [40] alcanzó ajustes muy similares al obtenido en el presente estudio al comparar el método empírico y el método del resistógrafo. Los resultados generaron regresiones con ajustes de hasta el 74 % y RECM bajos, lo cual asegura el uso del método empírico. Otras investigaciones recomiendan el uso del método empírico, puesto que es un método no destructivo, por la facilidad de la extracción y cálculo del volumen de la muestra en campo (2 hasta 10 minutos por muestra) [25, 40, 41], además porque es idóneo para especies con maderas duras o densas [42].



El método por desplazamiento de agua ha sido empleado para modelar la madera de distintas especies, debido a que en esta metodología está inmersa propiedades del tejido (e.g. *cambium* y fibras), mientras que, en el método empírico se considera a la muestra de madera como un cilindro perfecto [8, 43]. Debido a lo dicho anteriormente, en los resultados se observan variaciones entre las dos metodologías, aunque estas son mínimas (Tabla 2), lo cual demuestra la efectividad de hacer uso del método empírico. No obstante, esta metodología tiene limitaciones como el tamaño mínimo de la muestra (mayor a 5 cm de DAP), al igual que la deshidratación pronta en plantas jóvenes en las que las cortezas son delgadas [26, 44].

CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados de la comparación de medias, se concluye que la densidad de madera de la vegetación leñosa obtenida a través de dos metodologías no difiere significativamente, debido a que los valores mostraron fuertes similitudes al evaluar por hábito de crecimiento y en conjunto.

Los ajustes de las regresiones lineales están por encima del 85 %, asimismo, los valores del error de cada una de las regresiones mostraron ser bajos, por lo que se recomienda el uso del método empírico para especies arbóreas y arbustivas altoandinas.

Además, se recomienda hacer uso de la metodología empírica debido a que el procedimiento, tiempo e incluso uso de equipos es menor al invertido en el método por desplazamiento de agua u otros.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Laboratorio de Semillas y Ecología Forestal de la Universidad de Cuenca, al departamento de movilización de la Universidad de Cuenca y a ETAPA EP.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

Alberto Macancela Herrera y Byron Ortega Pillajo concibieron la investigación, metodología y realizaron el trabajo de campo.

Alberto Macancela Herrera y Pedro X. Astudillo realizaron el análisis de datos y redactaron el manuscrito.

DECLARACIÓN DE DISPONIBILIDAD DE DATOS

Los datos se encuentran disponibles en el repositorio de Zenodo con DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.17096770>

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran no tener conflictos de interés sobre esta investigación

REFERENCIAS

- [1] Macedo, P., & Madaleno, M. (2022). Global temperature and carbon dioxide nexus: Evidence from a maximum entropy approach. *Energies*, 16(1), 277. <https://doi.org/10.3390/en16010277>
- [2] Kabir, M., Habiba, U. E., Khan, W., Shah, A., Rahim, S., De Los Ríos-Escalante, P. R., Farooqi, Z., Ali, L., & Shafiq, M. (2023). Climate change due to increasing concentration of carbon dioxide and its impacts on environment in 21st century; a mini review. *Journal of King Saud University Science*, 35(5), 102693. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2023.102693>
- [3] Peres, C. B., Resende, P. M., Nunes, L. J., & Moraes, L. C. D. (2022). Advances in carbon capture and use (CCU) technologies: a comprehensive review and CO2 mitigation potential analysis. *Clean technologies*, 4(4), 1193-1207. <https://doi.org/10.3390/cleantechnol4040073>
- [4] Buotte, P. C., Law, B. E., Ripple, W. J., & Berner, L. T. (2020). Carbon sequestration and biodiversity co-benefits of preserving forests in the western United States. *Ecological Applications*, 30(2). <https://doi.org/10.1002/eap.2039>
- [5] Panchal, P., Preece, C., Peñuelas, J., & Giri, J. (2022). Soil carbon sequestration by root exudates. *Trends in Plant Science*, 27(8), 749-757. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2022.04.009>
- [6] Elbasiouny, H., El-Ramady, H., Elbehiry, F., Rajput, V. D., Minkina, T., & Mandzhieva, S. (2022). Plant nutrition under climate change and soil carbon sequestration. *Sustainability*, 14(2), 914. <https://doi.org/10.3390/su14020914>
- [7] Zhang, J., Wang, X. Jun, Wang, J. Ping, & Wang, W. xia. (2014). Carbon and nitrogen contents in typical plants and soil profiles in Yanqi basin of Northwest China. *Journal of Integrative Agriculture*, 13(3), 648–656. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(13\)60723-6](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(13)60723-6)
- [8] Tony, F., Thibaut, F., Guillaume, G., Julie, B., & Robert, S. (2019). Modelling wood density and modulus of elasticity in white spruce plantations in eastern Québec. *The Forestry Chronicle*, 95(3), 196–206. <https://doi.org/10.5558/tfc2019-028>
- [9] Chave, J., Andalo, C., Brown, S., Cairns, M. A., Chambers, J. Q., Eamus, D., Fölster, H., Fromard, F., Higuchi, N., Kira, T., Lescure, J., Nelson, B. W., Ogawa, H., Puig, H., Riéra, B., & Yamakura, T. (2005). Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecologia*, 145(1), 87–99. <https://doi.org/10.1007/s00442-005-0100-x>
- [10] Yeboah, D., Burton, A. J., Storer, A. J., & Opuni-Frimpong, E. (2014). Variation in wood density and carbon content of tropical plantation tree species from Ghana. *New Forests*, 45(1), 35–52. <https://doi.org/10.1007/s11056-013-9390-8>
- [11] Violle, C., Navas, M.-L., Vile, D., Kazakou, E., Fortunel, C., Hummel, I., & Garnier, E. (2007). Let the concept of trait be functional! *Oikos*, 116(5), 882–892. <https://doi.org/10.1111/j.2007.0030-1299.15559.x>
- [12] Phillips, O. L., Sullivan, M. J., Baker, T. R., Monteagudo Mendoza, A., Vargas, P. N., & Vásquez, R. (2019). Species matter: wood density influences tropical forest biomass at multiple scales. *Surveys in Geophysics*, 40(4), 913–935. <https://doi.org/10.1007/s10712-019-09540-0>
- [13] Nguyen, H., Firn, J., Lamb, D., & Herbohn, J. (2014). Wood density: A tool to find complementary species for the design of mixed species plantations. *Forest Ecology and Management*, 334. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.08.022>
- [14] Nadkarni, N. M., & Wheelwright, N. T. (Eds.). (2000). *Monteverde: ecology and conservation of a tropical cloud forest*. Oxford University Press. <http://digitalcommons.bowdoin.edu/scholars-bookshelf/1>
- [15] De Mil, T., Tarelkin, Y., Hahn, S., Hubau, W., Deklerck, V., Debeir, O., Van Acker, J., De Cannière, C., Beeckman, H., & Van Den Bulcke, J. (2018). Wood density profiles and their corresponding tissue fractions in tropical angiosperm trees. *Forests*, 9(12), 763. <https://doi.org/10.3390/f9120763>
- [16] Ordóñez Díaz, J. A. B., Galicia Naranjo, A., Venegas Mancera, N. J., Hernández Tejada, T., Ordóñez Díaz, M. D. J., & Dávalos-Sotelo, R. (2015). Densidad de las maderas mexicanas por tipo de vegetación con base en la clasificación de J. Rzedowski: compilación. *Madera y bosques*, 21, 77–216. <https://doi.org/10.21829/myb.2015.210428>
- [17] Bouslimi, B., Koubaa, A., & Bergeron, Y. (2022). Regional, site, and tree variations of wood density and growth in *Thuja occidentalis* L. in the Quebec Forest. *Forests*, 13(12). <https://doi.org/10.3390/f13121984>
- [18] Nabais, C., Hansen, J. K., David-Schwartz, R., Klisz, M., Lopez, R., & Rozenberg, P. (2018). The effect of climate on wood density: what provenance trials tell us?. *Forest Ecology and Management*, 408. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.10.040>



- [19] Yang, H., Wang, S., Son, R., Lee, H., Benson, V., Zhang, W., Zhang, Y., Zhang, Y., Kattge, J., Boenisch, G., Schepaschenko, D., Karaszewski, Z., Stereńczak, K., Moreno-Martínez, A., Nabais, C., Birnbaum, P., Vieilledent, G., Weber, U., Birnbaum, P., Vieilledent, G., Weber, U., Carvalhais. (2024). Global patterns of tree wood density. *Global Change Biology*, 30(3), 1–13. <https://doi.org/10.1111/gcb.17224>
- [20] Sapkota, T.B., Jat, M.L., Jat, R.K., Kapoor, P., Stirling, C. (2016). Yield Estimation of Food and Non-food Crops in Smallholder Production Systems. In: Rosenstock, T., Rufino, M., Butterbach-Bahl, K., Wollenberg, L., Richards, M. (eds) *Methods for Measuring Greenhouse Gas Balances and Evaluating Mitigation Options in Smallholder Agriculture*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-29794-1_8
- [21] Gao, S., Wang, X., Wiemann, M. C., Brashaw, B. K., Ross, R. J., & Wang, L. (2017). A critical analysis of methods for rapid and nondestructive determination of wood density in standing trees. *Annals of Forest Science*, 74(2), 1–13. <https://doi.org/10.1007/s13595-017-0623-4>
- [22] Hackenberg, J., Wassenberg, M., Spiecker, H., & Sun, D. (2015). Non destructive method for biomass prediction combining TLS derived tree volume and wood density. *Forests*, 6(4), 1274–1300. <https://doi.org/10.3390/f6041274>
- [23] Gaitan-Alvarez, J., Moya, R., & Berrocal, A. (2019). The use of X-ray densitometry to evaluate the wood density profile of *Tectona grandis* trees growing in fast-growth plantations. *Dendrochronologia*, 55. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2019.04.004>
- [24] Demol, M., Calders, K., Krishna Moorthy, S. M., Van den Bulcke, J., Verbeeck, H., & Gielen, B. (2021). Consequences of vertical basic wood density variation on the estimation of aboveground biomass with terrestrial laser scanning. *Trees*, 35(2) <https://doi.org/10.1007/s00468-020-02067-7>
- [25] Jacquin, P., Longuetaud, F., Leban, J. M., & Mothe, F. (2017). X-ray microdensitometry of wood: A review of existing principles and devices. *Dendrochronologia*, 42, 42–50. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2017.01.004>
- [26] Olale, K., Yenesew, A., Jamnadass, R., Sila, A., & Shepherd, K. (2019). A simple field based method for rapid wood density estimation for selected tree species in Western Kenya. *Scientific African*, 5. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2019.e00149>
- [27] Zobel, B., & Jett, J. (1995). *Genetics of wood production*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-79514-5>
- [28] Musule, R., Bárcenas-Pazos, G. M., Pineda-López, M. D. R., Houbbron, E. P., & Sánchez-Velásquez, L. R. (2018). Desarrollo y evaluación de un método racional y no destructivo para la toma de muestras de maderas blandas utilizadas en análisis químicos. *Madera Bosques*, 24(1), 1–10. <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2411427>
- [29] Noh, J. K., Echeverría, C., Kleemann, J., Koo, H., Fürst, C., & Cuenca, P. (2020). Warning about conservation status of forest ecosystems in tropical Andes: National assessment based on IUCN criteria. *PLoS One*, 15(8). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0237877>
- [30] Musule, R., Bárcenas-Pazos, G. M., Pineda-López, M. D. R., Houbbron, E. P., & Sánchez-Velásquez, L. R. (2018). Development and evaluation of a rational and nondestructive sampling methodology for softwoods used in chemical analyses. *Madera Bosques*, 24(1), 1–10. <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2411427>
- [31] Tejedor Garavito, N., Dávila, Á. E., Caro, A. S., Murakami, A. A., Baldeón, A., Beltrán, H., Blundo, C., Espinoza, B. T. E., Claros, F. A., Gaviria, J., Gutiérrez, N., Khela, S., León, B., Cuadros, L. T. M. A., Camacho, L. R., Malizia, L., Millán, B., Moraes, R. M., Newton, A. C., Pacheco, S., Reynel, C., Ulloa, C., Cruz, V. O. (2014). *A regional Red List of montane tree species of the tropical Andes: Trees at the top of the world*. Botanic Gardens Conservation International. <https://www.bgci.org/resources/bgci-tools-and-resources/the-regional-red-list-of-montane-tree-species-of-the-tropical-andes/>
- [32] Pérez-Harguindeguy, N., Díaz, S., Garnier, E., Lavorel, S., Poorter, H., Jaureguiberry, P., Bret-Harte, M. S., Cornwell, W. K., Craine, J. M., Gurvich, D. E., Urcelay, C., Veneklaas, E. J., Reich, P. B., Poorter, L., Wright, I. J., Ray, P., Enrico, L., Pausas, J. G., De Vos, A. C., ... Cornelissen, J. H. C. (2013). New handbook for standardised measurement of plant functional traits worldwide. *Australian Journal of Botany*, 61(3), 167-234. <https://doi.org/10.1071/BT12225>
- [33] Francis, J. K. (1994). Wood density samples from Tropical Hardwoods. *Tree Planters' Notes*, 45(1), 10-12.
- [34] Kagawa, A., & Fujiwara, T. (2018). Smart increment borer: a portable device for automated sampling of tree-ring cores. *Journal of Wood Science*, 64(1), 52–58. <https://doi.org/10.1007/s10086-017-1668-6>
- [35] American Society for Testing and Materials (ASTM). (2022). *Standard test methods for density and specific gravity (relative density) of wood and wood-based materials*. Annual Book of ASTM Standards, 93. [https://img.antpedia.com/standard/files/pdfs_ora/20221211/astm/ASTM%20D2395-17%20\(2022\).pdf](https://img.antpedia.com/standard/files/pdfs_ora/20221211/astm/ASTM%20D2395-17%20(2022).pdf)



- [36] R Core Team. (2023). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.r-project.org/>
- [37] Tonouéwa, J. F. M. F., Biaou, S. S. H., Assèdé, E. S. P., Langbour, P., & Balagueman, O. R. (2022). Influence of growth parameters on wood density of *Acacia auriculiformis*. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 24. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2022000100419>
- [38] Kord, B., Hassankhani, M., & Pourpasha, M. M. (2015). Empirical statistical model for predicting wood properties of *Paulownia fortunei*. Part 1: Physical and biometrical properties. *Maderas, Ciencia y tecnología*, 17(4). <https://doi.org/10.4067/S0718-221X20150050000080>
- [39] Manzo, S. V., & Hernández, J. V. (1997). Método empírico para estimar la densidad básica en muestras pequeñas de madera. *Madera y bosques*, 3(1), 81-87. <https://doi.org/10.21829/myb.1997.311381>
- [40] Syofyan, L., & Maideliza, T. (2019). Variation of wood density and anatomical characters from altitude differences: Case study of selected fabaceae trees in west sumatra secondary forest, Indonesia. *KnE Engineering*, 190-203. <https://doi.org/10.18502/keg.v1i2.4444>
- [41] Joseph, J., James, D., Chai, L. T., Korom, A., Wong, W. V. C., Maripa, R. D., & Phua, M. H. (2022). Assessing intraspecific wood density variations of [*Syzygium* sp. in tropical forest of Southwest Sabah. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1053(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1053/1/012014>
- [42] Fundova, I., Funda, T., & Wu, H. X. (2018). Non-destructive wood density assessment of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) using Resistograph and Pilodyn. *PLoS ONE*, 13(9), 1–16. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0204518>
- [43] Olale, O. K. (2012). *Prediction of wood density and carbon-nitrogen content in tropical agroforestry tree species in western Kenya using infrared spectroscopy* [Doctoral dissertation, University of Nairobi]. Institutional Repository- University of Nairobi. <https://erepository.uonbi.ac.ke/handle/11295/10634>
- [44] Gough, G., & Barnes, R. D. (1984). A comparison of three methods of wood density assessment in a *pinus elliottii* progeny test. *South African Forestry Journal*, 128(1), 22–25. <https://doi.org/10.1080/00382167.1984.9628921>

Caracterización mecánica de la tenacidad a la fractura en modo I de laminados impresos multidireccionales de fibra continua

Jonathan D. Santos¹,* Luis Córdova Narváez¹, José Quichimbo Quichimbo¹

¹ Grupo de investigación ATEI, Ingeniería Civil, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador, Ingeniería Civil.

Autor para correspondencia/ corresponding author, e-mail: jsantos@ups.edu.ec

Mechanical characterization of mode I fracture toughness in multidirectional printed continuous fiber laminates.

Resumen

El mecanismo de fallo por delaminación entre capas representa uno de los más críticos en materiales compuestos laminados (FRP), y ha motivado el desarrollo de numerosos estudios al respecto. Gran cantidad de literatura aborda esta fenomenología en compuestos unidireccionales. Sin embargo, bajo condiciones reales de servicio, un compuesto laminado puede iniciar y propagar fractura en interfaces con orientaciones de fibra distintas. El presente estudio aborda la caracterización experimental de la tenacidad a la fractura en modo I de un material compuesto de fibra continua, fabricado mediante manufactura aditiva (AM). Se definieron configuraciones con interfaces multidireccionales, basadas en predicciones obtenidas por simulaciones numéricas que implementan elementos cohesivos. Se detalla el proceso de diseño y fabricación de laminados de probetas de doble viga en voladizo (DCB), garantizando un crecimiento estable de grietas y confinado en un mismo plano. Los resultados experimentales demostraron comportamientos válidos para la caracterización de la energía de fractura en todas las configuraciones idóneas. La morfología de fractura de las muestras representativas de cada configuración fue analizada mediante microscopía electrónica de barrido (SEM), evidenciando ciertas similitudes entre las imágenes y mecanismos de fallos específicos entre las muestras.

Palabras clave: manufactura aditiva, tenacidad a fractura, laminados multidireccionales, delaminación.

Abstract

The delamination failure mechanism between layers is one of the most critical in laminated composite materials (FRP) and has driven the development of numerous studies on the subject. A significant portion of the literature addresses this phenomenon in unidirectional composites. However, under real service conditions, a laminated composite may initiate and propagate fracture at interfaces with different fiber orientations. This study focuses on the experimental characterization of mode I fracture toughness in a continuous fiber-reinforced composite material manufactured using additive manufacturing (AM). Configurations with multidirectional interfaces were defined based on predictions obtained from numerical simulations that



Licencia Creative Commons
Atribución-NoComercial 4.0



Editado por /
Edited by:
Eva O.L. Lantsoght

Recibido /
Received:
15/02/2025

Aceptado /
Accepted:
15/04/2025

Publicado en línea /
Published online:
04/10/2025



implement cohesive elements. The design and fabrication process of laminated double cantilever beam (DCB) specimens is detailed, ensuring stable crack growth confined to a single plane. The experimental results showed valid behaviors for fracture energy characterization across all suitable configurations. The fracture morphology of representative specimens from each configuration was analyzed using scanning electron microscopy (SEM), revealing certain similarities in the images and specific failure mechanisms among the samples.

Keywords: additive manufacturing, fracture toughness, multidirectional laminates, delamination.

INTRODUCCIÓN

Los compuestos laminados termoplásticos de fibra continua (cFRP) brindan una relación atractiva de rigidez-peso y resistencia-peso, lo cual ha permitido su extensivo uso en sectores como la aeronáutica y la aeroespacial [1, 2, 3, 4]. Sin embargo, las técnicas de manufactura convencional de componentes estructurales compuestos requieren de mano de obra calificada, maquinaria de altos costos y procesos productivos complejos [5, 6, 7, 8, 9, 10, 11]. Estas exigencias limitan la factibilidad de producción de lotes reducidos, y dificultan aún más su aplicación en el proceso de prototipado versátil. La manufactura aditiva (AM) brinda una alternativa factible para superar estas limitaciones, ofreciendo la posibilidad de producir prototipos funcionales y componentes finales con geometrías complejas de manera eficiente [12, 13, 14, 15]. Actualmente, existen varias impresoras industriales y de sobremesa comerciales con la capacidad de crear cFRP mediante la tecnología de filamento compuesto preimpregnado, como las desarrolladas por Markforged® [16], 9T Labs® [17] y Anisoprint® [18]. En particular, el sistema Markforged® utiliza la tecnología de modelamiento por deposición fundida (FDM), integrando un cabezal de impresión con doble extrusor: uno para la deposición del filamento polimérico y el otro para el material compuesto, pudiendo ser este último la fibra continua de carbono, vidrio o aramida reforzando poliamida o nailon.

Los materiales compuestos fabricados con la tecnología Markforged® son considerados como estándares de referencia por la comunidad científica, por tanto, existen numerosos estudios sobre la caracterización experimental con énfasis en las propiedades mecánicas en el plano [19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26]. Actualmente, existe una cantidad limitada de investigaciones enfocadas en la caracterización interlaminar. Iragi et al. [27] determinaron por primera vez la tenacidad a la fractura interlaminar en modo I y modo II de cFRP de fibra de carbono reforzando una matriz polimérica de poliamida (CF/PA). Particularmente, la energía de fractura de modo I era superior que la de modo II, contrario a lo que usualmente se observa en compuestos convencionales. La energía de fractura en modo I es generalmente la más crítica y se utiliza como un valor conservador para fines de diseño [28], especialmente en FRP. Se asume que la tenacidad a la fractura aumenta de manera monótona desde el modo I (apertura de la grieta) hasta el modo II (deslizamiento por corte).

Contrario a la tendencia reportada por Iragi et al. [27] del material impreso CF/PA, Polyzos et al. [29] reportaron que la tenacidad a la fractura interlaminar en modo I



($G_{Ic,ini} = 1.38 \text{ kJ/m}^2$) es inferior a la correspondiente en modo II ($G_{IIc,ini} = 2.02 \text{ kJ/m}^2$). En este estudio, a diferencia del trabajo de Iragi et al. [27], no se emplearon dobladores durante los ensayos experimentales. En línea con esta condición experimental, Fonseca et al. [30] determinaron la tenacidad a la fractura en modo I de especímenes de PoliAmida-12 (PA) y PA reforzada con un 15 % en peso de fibras cortas de carbono (SCF/PA) empleando AM. Los autores señalaron que el uso de dobladores podría incrementar la tenacidad global, dado que el daño puede iniciarse en la zona de contacto entre los brazos del espécimen y los dobladores, incrementando la energía disipada durante el ensayo. La tenacidad a la fractura de los especímenes reforzados (1780 J/m^2) fue más del doble en comparación con el material sin refuerzo (800 J/m^2).

Por su parte, Goh et al. [31] investigaron por primera vez los efectos de los parámetros de fabricación sobre la respuesta de la tenacidad a la fractura interlaminar en modo I del CF/PA, mediante una impresora de código abierto llamada *Hello BeePrusa*. Los resultados mostraron que un aumento en la temperatura de extrusión puede incrementar la energía de fractura hasta en un 200 %.

He et al. [26] estudiaron el comportamiento de la tenacidad a la fractura interlaminar en un compuesto CF/PA, comparando muestras DCB sometidas a un proceso de post-procesamiento por compresión en caliente con muestras impresas sin dicho tratamiento. Los resultados mostraron que la energía de fractura de iniciación en las muestras post-procesadas fue aproximadamente el doble que en las muestras obtenidas mediante proceso de impresión regular. Los resultados revelaron que las muestras obtenidas mediante impresión regular experimentaron una energía de fractura de propagación casi tres veces superior en comparación con las muestras tratadas. Este incremento de tenacidad de las muestras no tratadas fue atribuido a una mayor cantidad de formación de puentes de fibras experimentados durante el proceso de caracterización mecánica.

Se evidencia una limitada cantidad de estudios en relación con la caracterización a la tenacidad a la fractura en modo I de compuestos CF/PA, y ningún estudio sobre delaminación en laminados multidireccionales. Consecuentemente, el presente trabajo aborda el diseño numérico y posterior validación experimental de muestras DCB multidireccionales fabricadas por impresión aditiva. El estudio se enfoca en garantizar la presencia de modos de propagación de grieta adecuados, validar experimentalmente los resultados obtenidos, y contribuir al avance del estado del arte en la caracterización de este tipo de material explorando su capacidad como una alternativa factible para su posible aplicación en componentes estructurales en diversos sectores.

MATERIALES Y MÉTODOS

Diseño de laminados multidireccionales

El presente estudio se llevó a cabo utilizando el conjunto de las propiedades mecánicas del material compuesto de fibra continua de carbono reforzando la matriz polimérica (CF/PA), detallado en la Tabla 1. El diseño de los laminados parte con el análisis del comportamiento elástico a flexión de las muestras DCB multidireccionales, conforme a los lineamientos de la normativa ISO-15024 [32]. Se establecen siete combinaciones



de orientaciones de las láminas en la interfase, siendo 0° , $\pm 15^\circ$, $\pm 30^\circ$ y $\pm 45^\circ$. Se evita la repetición de ángulos consistentemente con la naturaleza del estudio, con la finalidad de garantizar un proceso de apertura constante y simétrico durante el proceso de caracterización.

Se estableció una relación de rigidez a flexión entre los dos brazos de viga de las muestras igual o superior a 0.9. En consecuencia, todas las configuraciones de laminados que presenten una diferencia superior al 10 % en la rigidez a flexión entre ambos brazos de viga son descartadas del presente estudio. La configuración de los laminados inicia con la consideración de especímenes DCB delgados, conforme los resultados reportados por Santos et al. [33]. El espectro de muestras incorpora muestras con mayor rigidez a flexión, conforme lo reportado por Sebaey et al. [34]. El espectro de muestras generadas con este procedimiento se presenta en la Tabla 2.

La primera configuración del laminado, L1_12_12_01_02, donde L1 corresponde al nombre de la serie del laminado, los dos términos siguientes (12_12) indican la cantidad de capas en la viga inferior y superior, respectivamente, 01 y 02 indican la orientación de la capa de la interfase de la viga inferior y superior, respectivamente. La serie L1 establece una secuencia de apilado simétrica y balanceada en los dos brazos de viga. Donde el símbolo // indica la presencia de la interfase. Considerando las conclusiones de Sebaey et al. [34], el diseño de laminados incorpora muestras con espesores de 4 y 5 mm, ajustando la distribución de las capas en cada uno de los brazos, y respetando la relación de rigidez entre los brazos (0.9).

TABLA 1. Propiedades mecánicas del material compuesto CF/PA y su desviación estándar [33].
* Corresponde a los valores determinados por [27].

Propiedad	Valor y desviación estándar
Espesor de la capa (mm)	0.125
Resistencia transversal a compresión (MPa)	$66 \pm 6.6^*$
Resistencia longitudinal a tensión (MPa)	752 ± 88.6
Resistencia longitudinal a compresión (MPa)	$426 \pm 9.7^*$
Resistencia transversal a tensión (MPa)	49.3 ± 9.9
Resistencia a cortante (MPa)	31 ± 0.1
Tenacidad a la fractura en modo I (J/m^2)	1.7 ± 0.1
Tenacidad a la fractura en modo II (J/m^2)	2.3 ± 0.1
Módulo cortante en el plano (GPa)	2.1 ± 0.2
Coefficiente de Poisson	0.39 ± 0.03
Módulo elástico longitudinal (GPa)	66.5 ± 7.1
Módulo elástico transversal (GPa)	6.2 ± 1.1

TABLA 2. Configuraciones de la secuencia de apilado de las muestras obtenidas. “\$” indica la simetría impar y “//” significa el plano de delaminación.

Codificación	Configuración de apilado	Ángulos de la interfase
L1_12_12_θ ₁ -θ ₂	$[(\pm\theta_1/0_4)_s // (\pm\theta_2/0_4)_s]$	0/15, -15/15, -30/30
L2_16_16_θ ₁ -θ ₂	$[(\pm\theta_1/0_5)_s // (\pm\theta_2/0_5)_s]$	0/15, -15/15, -30/30, -45/45
L3_15_17_θ ₁ -θ ₂	$[(\pm\theta_1/0_5)_s // (\pm\theta_2/0_7)_s]$	0/30, -15/30, 15/30
L4_15_18_θ ₁ -θ ₂	$[(\pm\theta_1/0_5)_s // (\pm\theta_2/0_5)_s]$	0/45, -15/45, 15/45
L5_16_17_θ ₁ -θ ₂	$[(\pm\theta_1/0_5)_s // (\pm\theta_2/0_7)_s]$	-30/45, 30/45
L6_20_20_θ ₁ -θ ₂	$[(\pm\theta_1/0_8)_s // (\pm\theta_2/0_8)_s]$	0/15, -15/15, -30/30, -45/45
L7_19_21_θ ₁ -θ ₂	$[(\pm\theta_1/0_8)_s // (\pm\theta_2/0_9)_s]$	0/30, -15/30, 15/30
L8_19_22_θ ₁ -θ ₂	$[(\pm\theta_1/0_8)_s // (\pm\theta_2/0_9)_s]$	0/45, -15/45, 15/45
L9_20_21_θ ₁ -θ ₂	$[(\pm\theta_1/0_8)_s // (\pm\theta_2/0_9)_s]$	-30/45, 30/45

La campaña de simulación numérica de las muestras indicadas en la Tabla 2, fue desarrollada mediante la versión estudiantil del software comercial de elementos finitos (FE) Abaqus/Standard 6.14. Los especímenes fueron modelados conforme una longitud de 100 mm y un ancho de 22.5 mm. Con la intención de optimizar el costo computacional de cálculo, la longitud de la muestra se dividió en tres regiones, siendo, pre-grieta (50 mm), zona de propagación de grieta (40 mm) y una zona de unión (10 mm). Con la finalidad de captar adecuadamente el espectro de esfuerzos y desplazamientos durante el ensayo, se refinó el mallado en los bordes y en la punta de grieta como se puede apreciar en la Figura 1. Los dos brazos de viga fueron modelados con el elemento C3D8I, la disposición de capas y su orientación consideran lo detallado en la Tabla 2.

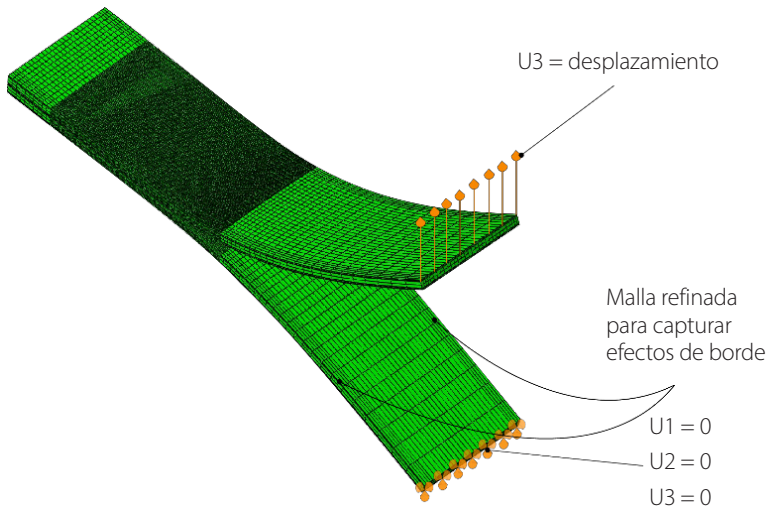


FIGURA 1. Modelo de simulación numérica para la campaña de MD-DCB.



La zona de propagación de grieta fue configurada mediante la implementación de elementos cohesivos de espesor despreciable, conforme a los lineamientos reportados por Turon et al. [35], esta configuración se desarrolló mediante la subrutina de elemento definido por el usuario, UEL. Adicionalmente, con la intención de observar modos de fallo de matriz en tensión, migración del plano de fractura interlaminar durante el ensayo, se implementó el criterio de fallo LaRC04 [36] mediante la variable de subrutina de usuario para generar la salida del elemento, UVARM.

El criterio de fallo LaRC04 [36] establece que, si durante el proceso de apertura el índice alcanza o supera a la unidad, la muestra experimenta el fallo, en este caso matriz a tensión. Consecuentemente, únicamente la serie de laminados L6 cumplió este lineamiento. Para asegurar la viabilidad de la posterior fase de validación experimental, se introdujo un factor de seguridad adicional de 2 a los laminados seleccionados. Por tanto, los especímenes multidireccionales de doble viga en voladizo (MD-DCB) de configuración L6 que cumplieron con esta evaluación son las interfases, 0/15, 15/-15 y 30/-30 y fueron considerados adecuados para su fabricación.

FABRICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LAMINADOS ADECUADOS

La serie de laminados L6 y sus tres orientaciones, 0/15, 15/-15 y 30/-30, fue seleccionada para el desarrollo de la campaña experimental subsiguiente. Estos laminados fueron manufacturados mediante la impresora The MarkTwo® de Markforged, la cual, mediante su software de código cerrado, Eiger™, establece la deposición de capas superiores, inferiores y de contorno de PA.

Con el propósito de exponer la sección interna de fibras y garantizar la adecuada configuración del laminado, estas capas externas fueron retiradas mediante el uso de una sierra equipada con disco de diamante. Así, se obtuvieron muestras posprocesadas con una dimensión final de 175 mm de longitud, 25 mm de ancho y 5 mm de espesor. Además, se incorporó una pre-grieta de 50 mm, generada mediante la colocación de una cinta Kapton™ en la interfaz durante una pausa en el proceso de impresión.

Las pruebas de experimentación mecánica se realizaron en condiciones ambientales controladas, con una humedad relativa de $50 \pm 5\%$ y una temperatura de 23 ± 2 °C, conforme lo indica la normativa ISO-15024 [32]. Se empleó una máquina universal de ensayos MTS Insight, equipada con una celda de carga de 5 kN. La carga y descarga fueron configuradas como 1.5 y 25 mm/min, respectivamente. Estos valores de desplazamiento controlado fueron ajustados en pruebas preliminares.

Se ensayaron seis muestras por cada configuración de interfase (0/15, 15/-15 y 30/-30). La determinación de la energía de fractura fue calculada mediante el método de la J-integral [37], y, por tanto, cada muestra fue instrumentada con inclinómetros (ver Figura 2).



FIGURA 2. Muestra MD-DCB post-procesada e instrumentada durante ensayo.

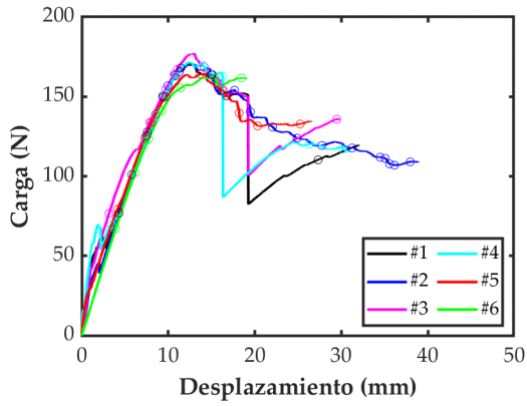
RESULTADOS

Las gráficas fuerzas vs desplazamiento de todas las orientaciones de la interfase, se ilustran en la Figura 3. En dichas curvas, las líneas continuas representan los datos registrados durante los ensayos, incluyendo las caídas de carga asociadas con el proceso de propagación de la grieta. Los símbolos circulares señalan las posiciones de longitud de grieta indicadas en la normativa ISO-15024 [32].

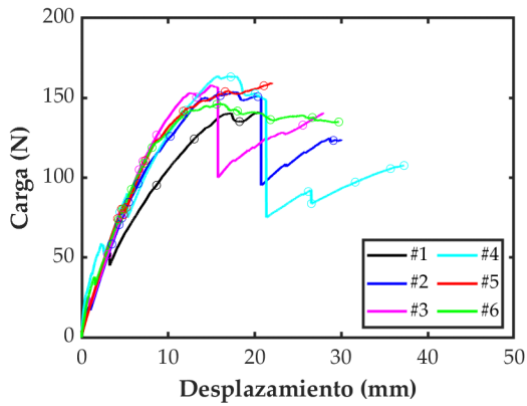
La configuración 0/15 experimentó el comportamiento más uniforme entre todos los lotes ensayados (Figura 3a), permitiendo que la totalidad de sus muestras fuesen consideradas en el proceso de reducción numérica de datos. Cabe destacar que, en las probetas #1 y #6, se identificaron caídas de carga a lo largo de la zona de propagación de fractura.

Por su parte, las curvas monotónicas reportadas por la configuración 15/-15 presentaron una mayor dispersión con relación a las muestras 0/15. En particular, la muestra #1 presentó una rigidez inferior con respecto a todo el resto del grupo (Figure 3b), motivo por el cual fue descartada del proceso de determinación de la tenacidad a la fractura de esta configuración. Asimismo, las muestras #2, #3, y #4 mostraron caídas de carga relevantes a lo largo de la zona de propagación de la grieta.

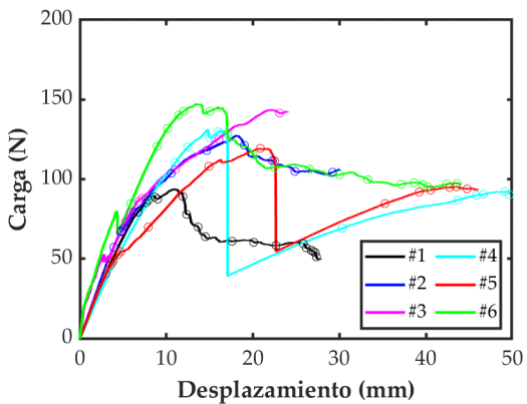
En las muestras con disposición 30/-30, se evidenció una relevante variabilidad entre las curvas fuerza vs desplazamiento (Figura 3c). En este caso, la muestra #6 alcanzó una fuerza máxima considerablemente mayor que todas las demás curvas, mientras que la muestra #5 presentó una rigidez reducida en el tramo no lineal de la curva. En contraste, la muestra #1 registró una fuerza máxima muy por debajo de todas las demás. Tras un análisis de la dispersión observada en los resultados, se determinó que las probetas #2 y #3 presentaron la mayor consistencia a lo largo de toda la curva. Por lo tanto, únicamente estos dos especímenes fueron seleccionados para la evaluación de la tenacidad a la fractura interlaminar de la configuración 30/-30.



Configuración 0/15



Configuración 15/15



Configuración 30/30

FIGURA 3. Curvas fuerza vs desplazamiento de las muestras MD-DCB. Elaboración propia.

Los valores de la tenacidad a la fractura obtenidos por cada configuración se presentan en la Tabla 3.

TABLA 3. Tenacidad a la fractura en modo I de los especímenes MD-DCB caracterizados.

Configuración	Iniciación (J/m ²)	Propagación (J/m ²)
0/15	1760 ± 160	2150 ± 100
15/-15	870 ± 70	1700 ± 250
30/-30	960 ± 660	1760 ± 350

Como se muestra en la Tabla 3, la mayor tenacidad de iniciación y de propagación fue experimentada por la configuración 0/15, mientras que la tenacidad de iniciación más baja fue observada para la configuración 15/-15. Curiosamente, la tenacidad de propagación para las configuraciones 15/-15 y 30/-30 son virtualmente las mismas.

DISCUSIÓN

Las muestras representativas de cada orientación de interfases fueron sometidas a un análisis mediante microscopía electrónica de barrido (SEM), con la finalidad de observar las características morfológicas de la superficie de fractura. Para ello, la superficie fracturada fue cuidadosamente cortada mediante un disco de diamante, y la observación se desarrolló con una tensión de aceleración de electrones de 7 kV.

Las superficies de fractura presentadas en la Figura 4 comparten características comunes, entre las que se destacan zonas con presencia de matriz dominante, zonas dominadas por fibra y espacios visibles entre la fibra y la matriz. Adicionalmente, es posible observar que la superficie es notablemente áspera y rugosa, lo cual es coherente con la naturaleza del material y el proceso de fabricación utilizado. Estas observaciones son consistentes con las reportadas en Iragi et al., Polyzos et al. y Santos et al. [27, 29, 33].

Además de las características comunes observadas entre todas las muestras, la configuración 0/15 evidenció algunas fibras separadas de la matriz (Figura 4a). En la superficie se distinguieron los filamentos alineados con las direcciones 0 y 15°, los cuales fueron marcados con líneas discontinuas de color azul. Con un aumento mayor, Figura 4b, se aprecia el entrecruzamiento de las fibras, así como los signos de deformación plástica en la resina circundante.

Con respecto a la configuración 15/-15, se observó una menor cantidad de fibras fracturadas y vacíos en comparación con el laminado anterior (Figura 4c). La superficie de fractura, observada con un mayor nivel de ampliación en el SEM, revela claramente el entrecruzamiento de las capas (Figura 4d), así como la deformación plástica de resina adyacente, además de fibras fragmentadas y parcialmente extraídas de la matriz.

Por su parte, en la configuración 30/-30 se observa claramente el entrecruzamiento de fibras (Figura 4e). Con un mayor aumento de la imagen, se aprecia una región central

con varias fibras orientadas a 30°, las cuales han sido removidas de dicha superficie. También se identifican marcas de desprendimiento de fibras sobre la resina, así como fibras fracturadas visibles en un plano superior de la imagen.

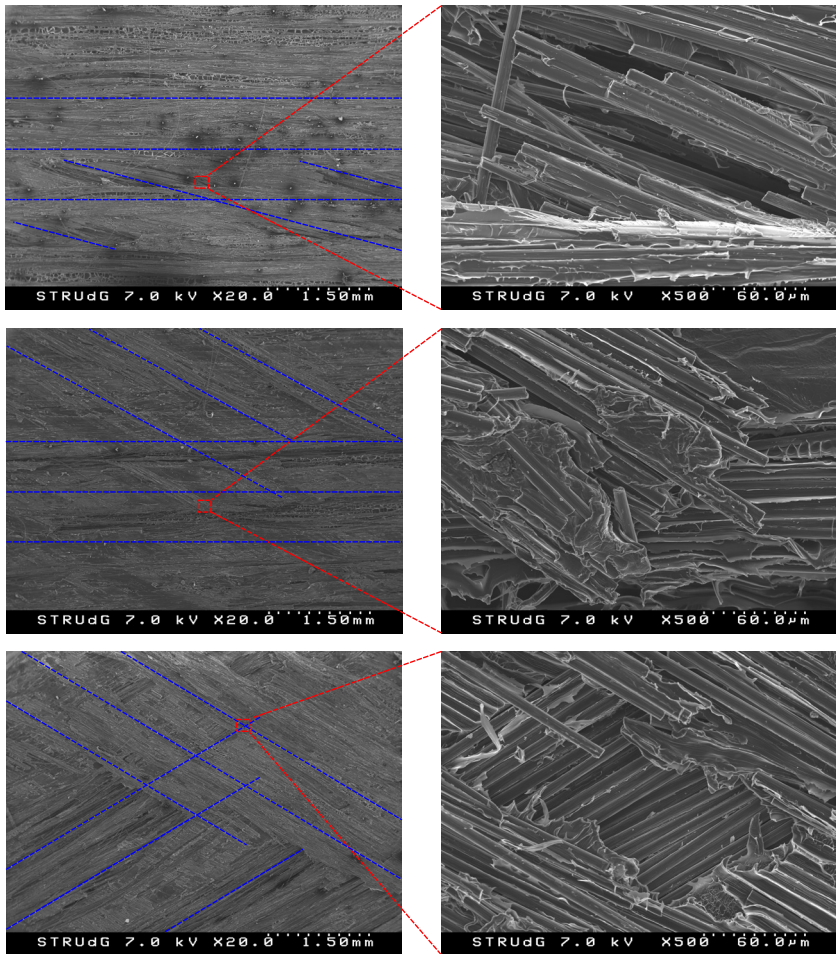


FIGURA 4. Imágenes SEM de las muestras representativas de cada configuración de laminado MD-DCB.
Elaboración propia.

CONCLUSIONES

En el presente trabajo se desarrolló una campaña de simulación numérica para evaluar el comportamiento de diversas configuraciones de secuencia de apilado durante un ensayo de caracterización de la tenacidad a la fractura interlaminar en modo I del material compuesto CF/PA. Los especímenes MD-DCB más idóneos fueron posteriormente ensayados, con la finalidad de validar la metodología numérica empleada. Los resultados experimentales se presentan mediante curvas fuerza vs desplazamiento; además,



para profundizar en el entendimiento del comportamiento del material, se analizaron imágenes SEM de muestras representativas de cada configuración. A continuación, se exponen las conclusiones derivadas de este estudio.

- Las muestras experimentaron una propagación de fractura en modo I puro durante todo el ensayo. De los dieciocho especímenes caracterizados, todos mostraron una propagación de fractura válida, excepto uno, que mostró un salto de grieta al inicio del ensayo. Esta validación experimental exitosa propicia una futura exploración del comportamiento en modo II de este material compuesto.
- El incremento del ángulo entre las dos interfases de la probeta tiene un impacto directo tanto en la tenacidad a la fractura interlaminar del material como en la repetibilidad de los resultados obtenidos. Tal como se observa en el diagrama fuerza vs desplazamiento, las orientaciones 0/15 y 15/-15 presentan una alta repetitividad y tendencias de comportamiento claramente definidas, mientras que la configuración 30/-30 mostró la menor repetitividad.
- El análisis fractográfico de las muestras representativas reveló características comunes entre todas las muestras, coincidente con estudios previos reportados en la literatura. Asimismo, se identificaron particularidades específicas de cada una de las configuraciones, especialmente observadas con un mayor aumento de la amplificación de la imagen en la zona del entrecruzamiento de fibras.

Es importante destacar que este comportamiento de fractura del compuesto CF/PA, ante distintas orientaciones pero con una configuración de laminado constante, constituye una característica inherente del material. Por tanto, los potenciales diseñadores deben tenerlo en cuenta al evaluar su posible aplicación en contextos de prototipado o en componentes finales sometidos a determinadas sollicitaciones de carga.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORES

Adquisición de financiamiento, administración del proyecto, conceptualización, investigación, desarrollo metodológico, validación, análisis formal, provisión de recursos, curación de datos, redacción del borrador original, y revisión y edición del manuscrito: Jonnathan D. Santos.

Validación, revisión y edición del manuscrito: Luis Córdova Narváez.

Validación, revisión y edición del manuscrito: José Quichimbo Quichimbo.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaramos que no tenemos conflicto de interés sobre esta investigación.

REFERENCIAS

- [1] Prashanth, S., Subbaya, K., Nithin, K., & Sachidananda, S. (2017). Fiber reinforced composites - a review. *Journal of Material Science & Engineering*, 6(03). <https://pdfs.semanticscholar.org/9d4a/93d3a6a3352f0e56738991609486856bd64e.pdf>
- [2] Chung D. (2010). *Composite materials: science and applications*. Springer Science & Business Media.
- [3] Mallick, P. (2007). *Fiber-reinforced composites: materials, manufacturing and design*. CRC press.
- [4] Gribniak, V. (2020). Special issue "Advanced composites: from materials characterization to structural application." *Materials*, 13(24). <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/ma13245820>
- [5] Luo, G., Liou, G., & Xiao, H. (2022). Using a fiber bragg grating sensor to measure residual strain in the vacuum-assisted resin transfer molding process. *Polymers*, 14(7). <https://doi.org/10.3390/polym14071446>
- [6] Liu, Z., Wang, H., Yang, L., & Du, J. (2022). Research on mechanical properties and durability of flax/glass fiber bio-hybrid FRP composites laminates. *Composite Structures*, 290. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.115566>
- [7] Link, T., Rosenberg, P., & Henning, F. (2022). Prediction of gaps in automated tape laying and their influence on porosity in consolidated laminates. *Journal of Composites Science*, 6(7). <https://doi.org/10.3390/jcs6070207>
- [8] Nazariipoor, H., Ashrafizadeh, H., Schultz, R., Runka, J., & Mertiny, P. (2022). Acoustic emission damage detection during three-point bend testing of short glass fiber reinforced composite panels: Integrity assessment. *Journal of Composites Science*, 6(2). <https://doi.org/10.3390/jcs6020048>
- [9] Xiao, H., Han, W., Tang, W., & Duan, Y. (2020). An efficient and adaptable path planning algorithm for automated fiber placement based on meshing and multi guidelines. *Materials*, 13(18). <https://doi.org/10.3390/MA13184209>
- [10] Maldonado-Hurtado, D., Madrigal, J., Penades, A., Ruiz, R., Crespo, A., & Sales, S. (2021). Pultruded FRP beams with embedded fibre bragg grating optical sensors for strain measurement and failure detection. *Sensors*, 21(21). <https://doi.org/10.3390/s21217019>
- [11] Fidan, I., Imeri, A., Gupta, A., Hasanov, S., Nasirov, A., Elliott, A., Alifui-Segbaya, F., & Nanami, N. (2019). The trends and challenges of fiber reinforced additive manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 102(5), 1801–1818. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-03269-7>
- [12] Penumakala, P. K., Santo, J., & Thomas, A. (2020). A critical review on the fused deposition modeling of thermoplastic polymer composites. *Composites Part B: Engineering*, 201. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108336>
- [13] Bettini, P., Alitta, G., Sala, G., & Di Landro, L. (2017). Fused deposition technique for continuous fiber reinforced thermoplastic. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 26(2), 843–848. <https://doi.org/10.1007/s11665-016-2459-8>
- [14] Kabir, S. F., Mathur, K., & Seyam, A. F. M. (2020). A critical review on 3D printed continuous fiber-reinforced composites: History, mechanism, materials and properties. *Composite Structures*, 232. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111476>
- [15] Parandoush, P., & Lin, D. (2017). A review on additive manufacturing of polymer-fiber composites. *Composite Structures*, 182, 36–53. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.08.088>
- [16] *Markforged*. (2019). *3D Printing Materials*. <https://markforged.com/composites/>
- [17] 9T Labs. (6 de marzo de 2024). *Carbon composite material*. <https://www.9tllabs.com/technology/material>
- [18] *Anisoprint Sarl*. (2018). <http://anisoprint.ru/>
- [19] Bendine, K., Gihardt, D., Fiedler, B., & Backs, A. (2022). Experimental characterization and mechanical behavior of 3D printed CFRP. *European Journal of Mechanics, A/Solids*, 94. <https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2022.104587>
- [20] Li, L., Liu, W., & Sun, L. (2022). Mechanical characterization of 3D printed continuous carbon fiber reinforced thermoplastic composites. *Composites Science and Technology*, 227. <https://doi.org/10.1016/j.compsitech.2022.109618>
- [21] Kikuchi, B. C., Bussamra, F. L. de S., Donadon, M. V., Ferreira, R. T. L., & Sales, R. de C. M. (2020). Moisture effect on the mechanical properties of additively manufactured continuous carbon fiber-reinforced nylon-based thermoplastic. *Polymer Composites*, 41(12), 5227–5245. <https://doi.org/10.1002/pc.25789>



- [22] Todoroki, A., Oasada, T., Mizutani, Y., Suzuki, Y., Ueda, M., Matsuzaki, R., & Hirano, Y. (2020). Tensile property evaluations of 3D printed continuous carbon fiber reinforced thermoplastic composites. *Advanced Composite Materials*, 29(2), 147–162. <https://doi.org/10.1080/09243046.2019.1650323>
- [23] Yogeshvaran, R. N., Liu, B. G., Farukh, F., & Kandan, K. (2020). Out-of-plane compressive response of additively manufactured cross-ply composites. *Journal of Mechanics*, 36(2), 197–211. <https://doi.org/10.1017/jmech.2019.59>
- [24] Parmiggiani, A., Prato, M., & Pizzorni, M. (2021). Effect of the fiber orientation on the tensile and flexural behavior of continuous carbon fiber composites made via fused filament fabrication. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 114(7). <https://doi.org/10.1007/s00170-021-06997-5>
- [25] Saeed, K., McIlhagger, A., Harkin-Jones, E., McGarrigle, C., Dixon, D., Ali Shar, M., McMillan, A., & Archer, E. (2022). Characterization of continuous carbon fibre reinforced 3D printed polymer composites with varying fibre volume fractions. *Composite Structures*, 282. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.115033>
- [26] He, Q., Wang, H., Fu, K., & Ye, L. (2020). 3D printed continuous CF/PA6 composites: Effect of microscopic voids on mechanical performance. *Composites science and technology*, 191. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2020.108077>
- [27] Iragi, M., Pascual-González, C., Esnaola, A., Lopes, C. S., & Aretxabaleta, L. (2019). Ply and interlaminar behaviours of 3D printed continuous carbon fibre-reinforced thermoplastic laminates: effects of processing conditions and microstructure. *Additive Manufacturing*, 30. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100884>
- [28] Conroy, M., Kinloch, A. J., Williams, J. G., & Ivankovic, A. (2015). Mixed mode partitioning of beam-like geometries: A damage dependent solution. *Engineering Fracture Mechanics*, 149(1), 351–367. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2015.06.061>
- [29] Polyzos, E., Katalagarianakis, A., Van Hemelrijck, D., & Pyl, L. (2021). Delamination analysis of 3D-printed nylon reinforced with continuous carbon fibers. *Additive Manufacturing*, 46. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102144>
- [30] Fonseca, J., Ferreira, I. A., Moura, M. F. S. F. De, Machado, M., & Alves, J. L. (2019). Study of the interlaminar fracture under mode I loading on FFF printed parts. *Composite Structures*, 214. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.02.005>
- [31] Goh, G., Yap, Y. L., Agarwala, S., & Yeong, W. Y. (2019). Recent progress in additive manufacturing of fiber reinforced polymer composite. *Advanced Materials Technologies*, 4(1). <https://doi.org/10.1002/admt.201800271>
- [32] International Organization for Standardization. (2001). *ISO 15024: Fibre-reinforced plastic composites — Determination of mode I interlaminar fracture toughness, GIc, for unidirectionally reinforced materials*.
- [33] Santos, J. D., Fernández, A., Ripoll, L., & Blanco, N. (2022). Experimental Characterization and Analysis of the In-Plane Elastic Properties and Interlaminar Fracture Toughness of a 3D-Printed Continuous Carbon Fiber-Reinforced Composite. *Polymers*, 14(3). <https://doi.org/10.3390/polym14030506>
- [34] Sebaey, T. A., Blanco, N., Lopes, C. S., & Costa, J. (2011). Numerical investigation to prevent crack jumping in Double Cantilever Beam tests of multidirectional composite laminates. *Composites Science and Technology*, 71(13), 1587–1592. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2011.07.002>
- [35] Soto, A., González, E. V., Maimí, P., Turon, A., Aja, J. R. S. De, & Escalera, F. M. De. (2016). Cohesive zone length of orthotropic materials undergoing delamination. *Engineering Fracture Mechanics*, 159, 174–188. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2016.03.033>
- [36] Pinho, S. T., Dávila, C. G., Camanho, P. P., Iannucci, L., & Robinson, P. (2005). *Failure models and criteria for FRP under in-plane or three-dimensional stress states including shear non-linearity* (NASA/TM-2005-213530). NASA.
- [37] Sarrado, C. (2015). *Experimental characterization and numerical simulation of composite adhesive joints using the cohesive zone model approach* [Tesis de doctorado, Universitat de Girona]. Repositorio institucional. <http://hdl.handle.net/10803/384001>

Organismos fotosintéticos y calidad de agua en ríos amazónicos, caso de estudio Yacuambi, Zamora Chinchipe

Victor Alonso Cartuche ^{1*}, Nikolay Aguirre Mendoza², Roberth Yaguana Neira², Roberto Bustillos-Huilca³, Vinicio Alvarado Jaramillo⁴, Max Encalada Córdova⁵, Josselyn Balcazar⁴

¹Centro de Investigaciones Tropicales del Ambiente y Biodiversidad (CITIAB), carrera de Ingeniería Ambiental, Universidad Nacional de Loja.

²Centro de Investigaciones Tropicales del Ambiente y Biodiversidad (CITIAB)

³ Universidad Nacional de Loja, carrera de Medicina Veterinaria

⁴ Universidad Nacional de Loja, carrera de Ingeniería Ambiental

⁵ Universidad Nacional de Loja, carrera de Agronomía

* Autor para Correspondencia / Corresponding Author, e-mail: cartuchea@gmail.com

Photosynthetic organisms and water quality in Amazonian rivers, case study Yacuambi, Zamora Chinchipe

Resumen

Las actividades mineras y la ganadería en el cantón Yacuambi alteran las condiciones ecológicas de cuerpos hídricos, especialmente de ríos y fuentes abastecedoras de agua para consumo humano. En este trabajo de investigación se evaluó la calidad del agua aplicando métodos basados en bioindicadores, específicamente fitoplancton, como mecanismo que complementa la evaluación fisicoquímica. El fitoplancton desempeña un papel importante en la estructura y producción primaria de los ecosistemas acuáticos, de manera que, estudiar su composición y estructura es un indicador biológico de la calidad del agua. *In situ*, se tomaron muestras de agua para el análisis fisicoquímico (pH, oxígeno disuelto, conductividad, sólidos totales disueltos, temperatura, nitratos y fosfatos) y biológico (diatomeas). A nivel de laboratorio se realizó microscopía y cuantificación de células fitoplanctónicas que permitió aplicar un índice para determinar la calidad del agua. La aplicación del Índice Diatomológico General (IDG) reveló diferencias significativas en la calidad del agua ($p < 0.05$) entre la quebrada Santa Inés y los ríos Yacuambi y El Salado. En cuanto a la abundancia se registraron individuos de los géneros *Microspora*, *Ulothrix*, *Navicula*, *Gomphonema* y *Ulnaria*. La temperatura, oxígeno disuelto y conductividad fueron las variables que más se diferenciaron entre los ríos estudiados ($p < 0.05$). Un análisis multivariado mostró la conformación de grupos específicos para cada uno de los ríos estudiados, grupos que incluyeron organismos fitoplanctónicos indicadores de una buena o mala calidad de agua y aspectos fisicoquímicos que, explicaron en todos los casos, al menos un 69 % de la variabilidad de la información contenida en la base de datos.

Palabras clave: diatomeas, bioindicadores, Índice Diatomológico General, calidad de agua



Licencia Creative Commons
Atribución-NoComercial 4.0



Editado por /
Edited by:
Sebastián Ponce

Recibido /
Received:
19/03/2025

Aceptado /
Accepted:
20/06/2025

Publicado en línea /
Published online:
25/11/2025

Abstract

Mining and livestock activities in the Yacuambi canton significantly alter the ecological conditions of aquatic bodies, particularly rivers and water sources used for human consumption. This study evaluated water quality using methods based on bioindicators, specifically phytoplankton, as a complementary approach to physicochemical assessments. Phytoplankton play a crucial role in the structure and primary production of aquatic ecosystems; therefore, analyzing their composition and structure serves as a biological indicator of water quality. *In situ* water samples were collected for both physicochemical analysis (pH, dissolved oxygen, conductivity, total dissolved solids, temperature, nitrates, and phosphates) and biological analysis (diatoms). In the laboratory, microscopy and quantification of phytoplanktonic cells were conducted, enabling the application of an index to determine water quality. The application of the General Diatom Index (GDI) revealed significant differences in water quality ($p < 0.05$) among the Santa Inés stream and the Yacuambi and El Salado rivers. In terms of abundance, individuals from the genera *Microspora*, *Ulothrix*, *Navicula*, *Gomphonema*, and *Ulnaria* were recorded. Temperature, dissolved oxygen, and conductivity were the variables that most differentiated the studied rivers ($p < 0.05$). Multivariate analysis revealed the formation of specific groups for each river, including phytoplankton organisms that serve as indicators of water quality and physicochemical variables, which together explained at least 69 % of the data variability in all cases.

Keywords: Diatom, bioindicators, General Diatomological Index, water quality

INTRODUCCIÓN

En los países en vías de desarrollo, la contaminación del agua constituye uno de los principales problemas que afectan a los ecosistemas acuáticos. El vertido de desechos mineros, domésticos, industriales y de otras fuentes, sin un tratamiento adecuado, altera significativamente la calidad del agua, la cual, en muchos casos, se puede utilizar para la ganadería, la agricultura e incluso el consumo humano [1].

Actualmente, la evaluación de la calidad del agua se realiza mediante mediciones de parámetros fisicoquímicos, que requieren equipos especializados capaces de detectar componentes orgánicos e inorgánicos que deterioran la calidad del agua. Sin embargo, los resultados obtenidos solo reflejan la condición del momento de la toma de la muestra [2].

Ante estas limitaciones, es necesario el empleo de organismos vivos como bioindicadores para determinar el estado ecológico de los cuerpos de agua. Entre los más utilizados se encuentran los peces, macroinvertebrados y el fitoplancton [3]. En zonas influenciadas por minería, las altas concentraciones de metales pesados en el agua generan efectos negativos en la morfología de las diatomeas, lo cual genera deformaciones en el frústulo. Además, provocan la desaparición de diatomeas sensibles a la contaminación, las cuales son reemplazadas por taxones más tolerantes [4].

El fitoplancton, al igual que los macroinvertebrados, son ampliamente empleados en la evaluación de la calidad del agua, ya que ambos constituyen componentes clave de la



biodiversidad acuática. Estos bioindicadores ofrecen información tanto de las condiciones pasadas como de las condiciones actuales de la calidad del agua. El análisis de su estructura permite identificar la presencia de individuos tolerantes o sensibles a la contaminación [5].

El fitoplancton desempeña un rol central en la estructura y funcionamiento de ecosistemas de agua dulce, ya que tanto las algas como las cianobacterias son componentes clave de la producción primaria [6]. En este sentido, las algas se han destacado como bioindicadores de la calidad del agua a nivel de poblaciones y comunidades, debido a su alto grado de sensibilidad a los contaminantes ambientales y a sus ciclos de vida cortos, lo que permite determinar en el corto plazo el estado ecológico de un cuerpo de agua [7].

La composición y la diversidad de estos organismos son el resultado de la interacción entre sus rasgos biológicos y diversos factores ambientales como la disponibilidad de nutrientes, la materia orgánica, el sedimento y la composición química del agua [8, 9]. Por ello, se han planteado diferentes índices para determinar la calidad del agua, entre los cuales destaca el Índice Diatómico General (IDG), el cual enfoca su análisis en los niveles de polución, la abundancia y la capacidad de adaptación presentados por las comunidades de diatomeas (Bacillariophyta) [10].

En el cantón Yacuambi, provincia de Zamora Chinchipe, el 43,76 % de su territorio se encuentra concesionado para actividades mineras, siendo el oro el principal recurso no renovable presente en el subsuelo. Actualmente, este mineral es extraído por lugareños del territorio bajo prácticas artesanales de explotación sin la presencia de ninguna medida al menos para mitigar en parte los graves daños que producen a los ecosistemas acuáticos [11].

En los últimos cinco años, la actividad minera en Yacuambi ha generado el deterioro de las condiciones ecológicas de importantes cuerpos hídricos, generando riesgos para la salud humana, así como para las comunidades acuáticas y el funcionamiento ecosistémico. Además, esta situación ha provocado polarizaciones importantes entre grupos sociales, generando conflictos socioambientales que agravan más la problemática alrededor de la minería. Ante esta realidad, este trabajo de investigación evaluó la calidad del agua aplicando métodos basados en bioindicadores como un mecanismo complementario a la evaluación fisicoquímica. Este enfoque busca generar información científica que permita evidenciar ante los actores sociales, políticos y el sector privado las consecuencias de la minería sobre las condiciones de calidad del agua de importantes cuerpos hídricos de Yacuambi. Particularmente, este trabajo de investigación implementa una metodología innovadora que permite evaluar la calidad de agua usando organismos fotosintéticos (diatomeas) como bioindicadores, complementando así la evaluación basada en información fisicoquímica que comúnmente se lleva a cabo en estudios de calidad de agua.

MATERIALES Y MÉTODOS

La parroquia 28 de Mayo, ubicada en el cantón Yacuambi (Fig. 1), limita al norte con las provincias de Azuay y Morona Santiago; al sur, con el cantón Zamora; al este, con el cantón Yantzaza y la provincia de Morona Santiago; y al oeste, con las provincias de Loja y Azuay [12].

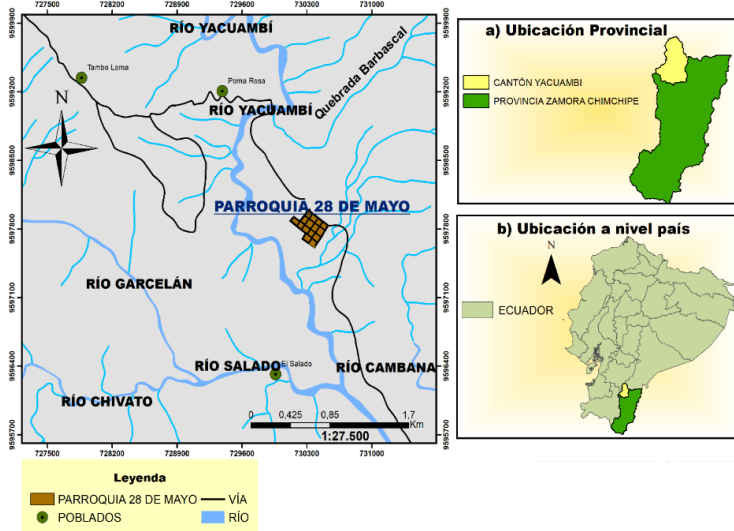


Figura 1. Ubicación de la parroquia 28 de mayo, cantón Yacuambi. Elaboración propia

El monitoreo de la calidad del agua se realizó en tres sistemas hídricos: la quebrada Santa Inés, el río Yacuambi y el río El Salado (Fig. 2). La quebrada Santa Inés abastece agua para la zona urbana de la parroquia 28 de Mayo y presenta importantes indicios de alteración por el avance de la frontera ganadera. Por su parte, en los ríos Yacuambi y el Salado, se desarrollan actividades mineras artesanales no regularizadas.

En el caso de los ríos El Salado y Yacuambi la definición de puntos de muestreo tuvo como referencia zonas intervenidas por minería. Para ambos casos se determinó una distancia longitudinal de un kilómetro siguiendo el cauce de los ríos. La distancia entre los puntos estudiados fue de 200 metros (5 puntos por cada río).

Para la quebrada Santa Inés, los puntos de estudio se establecieron desde la zona de recarga hídrica hasta la zona de captación, definiendo cinco puntos de muestreo cada 150 metros. Además, en los puntos de monitoreo de la quebrada Santa Inés, el río Yacuambi y el río El Salado, se aplicó el Índice de Calidad de Bosque de Ribera (QBR), mismo que evalúa la vegetación ribereña, considerando 4 aspectos: grado de cobertura de la cubierta vegetal, estructura de la vegetación, calidad de la cubierta vegetal y grado de naturalidad del canal fluvial, cada uno con valores del 1 a 25 [13], el resultado es la suma de todos los bloques (Tabla 1).

Tabla 1. Categorías Índice de Calidad de Bosque de Ribera [14]

Nivel de calidad	QBR	COLOR
Bosque de ribera sin alteraciones, en condiciones naturales	≥95	Azul
Bosque ligeramente perturbado, calidad buena	75-90	Verde
Inicio de alteración importante, calidad intermedia	55-70	Amarillo
Alteración fuerte, mala calidad	30-50	Naranja
Degradación extrema, calidad pésima	≤25	Rojo

Fuente: Copyright # 2002 John Wiley & Sons, Ltd.

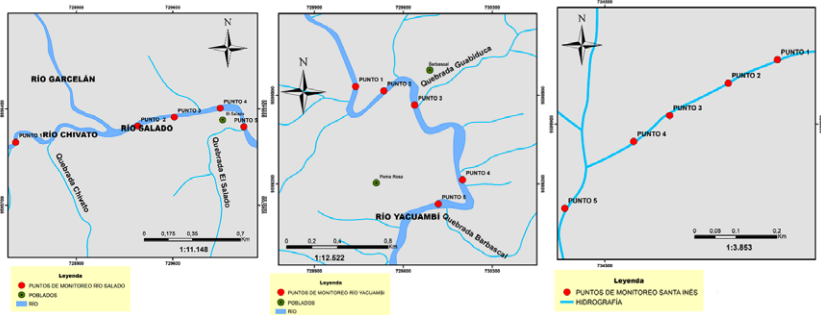


Figura 2. Cuerpos hídricos monitoreados en la parroquia 28 de Mayo, cantón Yacuambi. Elaboración propia.

Se utilizó una sonda multiparamétrica modelo Hanna HI9819 para registrar, en cada punto de muestreo definido para los tres ríos, las lecturas de oxígeno disuelto, temperatura, pH, sólidos totales disueltos y conductividad eléctrica. Además, en Santa Inés y en El Salado se tomaron muestras de agua para el análisis de nutrientes como fosfatos (método por ácido ascórbico) y nitratos (método por reducción con cadmio), los mismos que se realizaron en el laboratorio certificado de la Universidad Técnica Particular de Loja (UTPL).

Para estudiar las diatomeas epilíticas, las muestras fueron recogidas de sustratos naturales, preferentemente rocas de 10 a 20 cm de diámetro, sumergidas en agua a una profundidad de 10 a 20 cm, en lugares con luz solar y que presenten un biofilm parduzco en la superficie, condición que caracteriza la colonización de algas diatomeas en el sustrato. Para retirar las diatomeas del sustrato, se usó un cepillo de dientes para raspar la superficie colonizada en 5 rocas. Una vez finalizado el raspado, se transfirió la muestra del recipiente a un frasco de plástico de 100 ml que fue etiquetado con cinta adhesiva. Luego, se añadió solución de Lugol (1 %) a las muestras para su conservación [15].

Las muestras biológicas fueron trasladadas en cadena de frío y almacenadas en el Laboratorio de Ecología Acuática de la Universidad Técnica Particular de Loja (UTPL) donde se realizó la microscopía. Para la identificación y conteo celular, las muestras fueron transferidas a tubos falcon de 50 ml y decantadas por un periodo de 12 horas. Durante este tiempo, el material que contiene las comunidades de diatomeas se sedimenta al fondo del tubo.

Posteriormente, se extrajo una alícuota de 1 ml de muestra, la cual se depositó en una cámara de recuento Sedgewick Rafter. El conteo celular se realizó de acuerdo a Guzman y Leiva [16], utilizando un microscopio ZEISS Axiolab 5. Inicialmente, se realizó un barrido preliminar con un aumento de 10X para verificar la abundancia de individuos y determinar si la población es densa. El conteo de los individuos se realizó con un aumento de 10X en 30 campos de visión, siguiendo la metodología de McAlice [17], quien demostró que un recuento de 30 cuadrantes en una cámara de recuento Sedgewick Rafter permite identificar entre el 90 % y el 95 % de las especies presentes en la muestra. Finalmente, los especímenes observados fueron registrados en una matriz, junto con su respectiva abundancia en cada uno de los 30 campos de visión.



La identificación taxonómica se realizó mediante microfotografías utilizando el microscopio ZEISS Axiolab 5. Para ello, se colocó una gota de la muestra sedimentada en un portaobjetos para observar y fotografiar especímenes con un aumento de 40X. La identificación de los organismos se realizó hasta nivel de género [18].

Además, se obtuvieron los siguientes índices biológicos: diversidad de Shannon-Weinner, equitatividad y riqueza. La determinación de la riqueza se basó en el conteo del número de géneros presentes en cada río. Para determinar la calidad del agua se aplicó el Índice Diatómico General (IDG) (Ecuación 1), que considera la variabilidad y sensibilidad de géneros de diatomeas, y que responden a cambios de la calidad del agua [10]. Los resultados del índice fueron comparados de acuerdo a los niveles de calidad de la Tabla 2.

$$\text{Índice} = \frac{\sum_{j=1}^n A_j * S_j * V_j}{A_j * V_j} \quad (1)$$

Donde:

A_j: abundancia relativa, es decir la cantidad de géneros en relación a la muestra.
V_j: variabilidad del género o amplitud ecológica, donde: 1 (ubicua) a 3 (característica).

S_j: sensibilidad a la contaminación, donde: 1 (resistente) a 5 (sensible).

Tabla 2. Categorías de calidad de agua para el índice diatómico general (Rumeau y Coste, 1988)

Valor	Significado
IDG>4.5	Calidad biológica óptima
4<IDG<4.5	Calidad normal-polución débil
3.5<IDG<4	Polución moderada-eutrofización
3<IDG<3.5	Polución media-eutrofización acentuada
2<IDG<3	Desaparición de especies sensibles-polución fuerte
1<IDG<2	Polución muy fuerte
IDG=0	Polución tóxica-por debajo de 10 individuos por mm ²

Para el análisis estadístico, se empleó estadística descriptiva para resumir las condiciones fisicoquímicas de los cuerpos de agua. Las variables continuas se describieron mediante promedios y desviación estándar. Para comparar los parámetros fisicoquímicos entre los tres ríos, se aplicó la prueba no paramétrica Kruskal-Wallis cuando los datos no tuvieron una distribución normal. Adicionalmente, se realizó un análisis de componentes principales (ACP) para observar las tendencias de variación individual de los ríos estudiados y reconocer eventualmente los agrupamientos particulares. Los datos completos fueron exportados a una hoja de cálculo de Microsoft Excel 2016 para su limpieza y codificación, y posteriormente transferidos al programa R, versión 4.2.3, para el análisis estadístico subsiguiente.

RESULTADOS

En la quebrada Santa Inés, según lo indicado en la Tabla 3, la calidad del bosque de ribera en la mayor parte de los puntos de monitoreo presenta indicios de una alteración importante, por lo tanto, la calidad de bosque de ribera se clasifica como intermedia.

Tabla 3. Índice de calidad de bosque de ribera de la quebrada Santa Inés, cantón Yacuambi

Punto de monitoreo	QBR	Nivel de calidad
Quebrada Santa Inés	Punto 1	75 Bosque ligeramente perturbado, calidad buena
	Punto 2	70 Inicio de alteración importante, calidad intermedia
	Punto 3	70 Inicio de alteración importante, calidad intermedia
	Punto 4	70 Inicio de alteración importante, calidad intermedia
	Punto 5	40 Alteración fuerte, mala calidad

En el río Salado, según lo indicado en la Tabla 4, en la mayor parte de los sitios evaluados la calidad del bosque de ribera oscila entre un estado de bosque ligeramente perturbado y uno de alteración fuerte; sin embargo, en el punto 3 se observa una degradación extrema de la cobertura ribereña.

Tabla 4. Índice de calidad de bosque de ribera del río El Salado, cantón Yacuambi

Punto de monitoreo	QBR	Nivel de calidad
Río El Salado	Punto 1	75 Bosque ligeramente perturbado, calidad buena
	Punto 2	85 Bosque ligeramente perturbado, calidad buena
	Punto 3	15 Degradación extrema, calidad pésima
	Punto 4	35 Alteración fuerte, mala calidad
	Punto 5	30 Alteración fuerte, mala calidad

La aplicación del Índice de Calidad del Bosque de Ribera (QBR) mostró que, según la Tabla 5, en el río Yacuambi la mayor parte de los sitios monitoreados presenta una alteración fuerte; por lo tanto, existe una mala calidad de ribera

Tabla 5. Índice de calidad de bosque de ribera del río Yacuambi, cantón Yacuambi

Punto de monitoreo	QBR	Nivel de calidad
Río Yacuambi	Punto 1	40 Alteración fuerte, mala calidad
	Punto 2	55 Inicio de alteración importante, calidad intermedia
	Punto 3	35 Alteración fuerte, mala calidad
	Punto 4	35 Alteración fuerte, mala calidad
	Punto 5	35 Alteración fuerte, mala calidad

En la Tabla 6 se indican los valores promedio de las variables fisicoquímicas de los lugares estudiados. La quebrada Santa Inés presentó la mayor concentración de fosfatos y nitratos. El pH en las tres zonas de estudio fue ácido y la mayor acidez se presentó en el río Yacuambi. La mayor concentración de oxígeno disuelto se registró en la quebrada Santa Inés y la menor en el río El Salado. La quebrada Santa Inés presentó el valor más alto de conductividad y concentración de Sólidos Totales Disueltos (STD). Con respecto a la temperatura, el río Yacuambi y El Salado presentaron los valores más altos.

Tabla 6. Promedios y desviación estándar de parámetros fisicoquímicos de las zonas de estudio en el cantón Yacuambi

Parámetro	Quebrada Santa Inés	Desv. Estan.	Río Yacuambi	Desv. Estan.	Río El Salado	Desv. Estan.
Fosfato (mg/L)	0.33	0.14	(...)	(...)	0.28	0.10
Nitratos (mg/L)	4.98	2.26	(...)	(...)	1.59	0.28
pH	6.71	0.45	5.91	0.58	6.32	0.21
Oxígeno disuelto (mg/L)	10.20	1.84	9.35	1.03	6.83	1.20
Conductividad (uS/cm)	28.4	0.55	23.4	2.70	18.2	7.56
Sólidos Totales Disueltos (mg/L)	13.6	0.89	11.6	1.34	9.2	4.09
Temperatura (°C)	15.89	0.20	20.16	0.91	18.654	0.29

(...): Valor no registrado

Desv. Estan.: desviación estándar

De acuerdo a la Figura 3, la mayor diversidad de comunidades de diatomeas se reportó en la quebrada Santa Inés ($H'=2.21$) y en el río El Salado ($H'=2.14$), mientras que la menor se observó en el río Yacuambi ($H'=1.92$). La equitatividad fue mayor en el río El Salado ($E=0.83$) y en el río Yacuambi ($E=0.83$), y menor en la quebrada Santa Inés ($E=0.80$). Con respecto a la riqueza, obtuvo su mayor valor en la quebrada Santa Inés (16 géneros) y en el río El Salado (13 géneros), mientras que el valor más bajo se registró en el río Yacuambi (10 géneros).

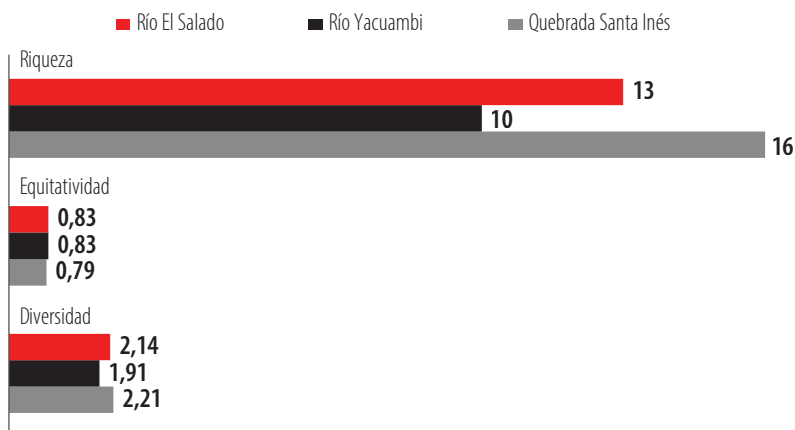


Figura 3. Índices biológicos de diversidad, equitatividad y riqueza de la quebrada Santa Inés, río Yacuambi y río el Salado, cantón Yacuambi

En la quebrada Santa Inés *Gomphonema lagenula* fue la más abundante. Otros taxones con importantes abundancias fueron: *Gomphonema* y *Rhoicosphenia curvata* (Fig. 4).

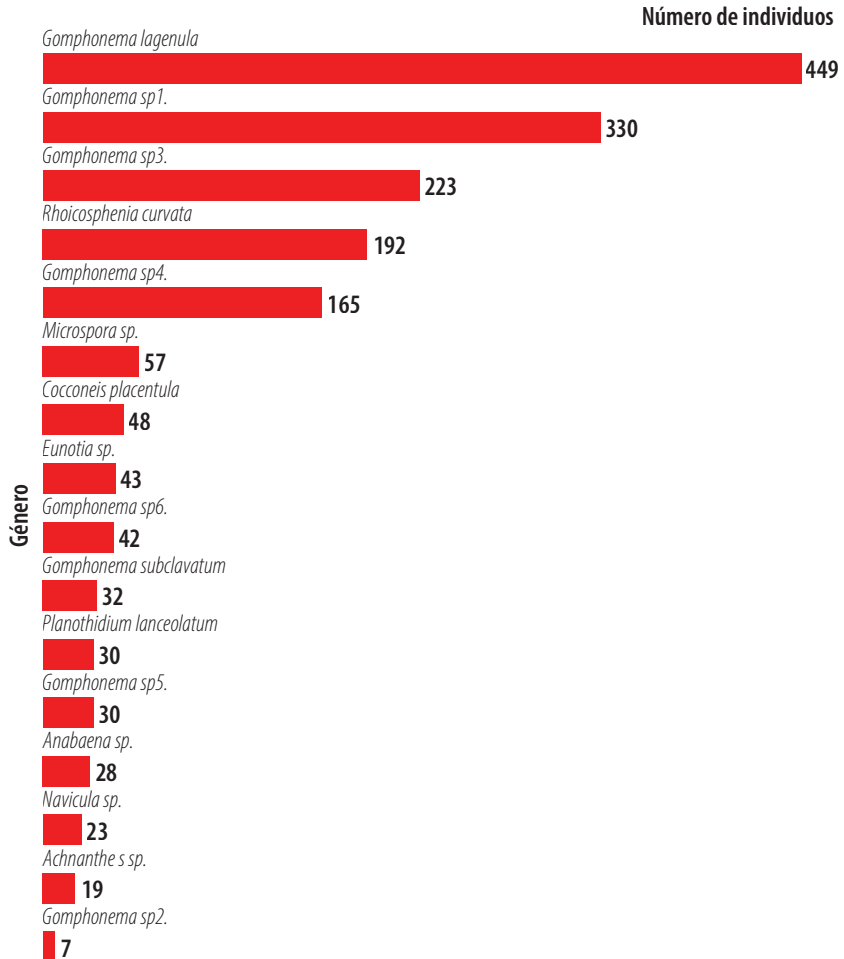


Figura 4. Abundancia de comunidades fotosintéticas en la quebrada Santa Inés, cantón Yacuambi

En el río Yacuambi (Fig. 5), la mayor abundancia correspondió al género *Navicula*. Taxones como *Gomphonema*, *Psammothidium*, *Encyonema* y *Ulnaria* también presentaron abundancias importantes.

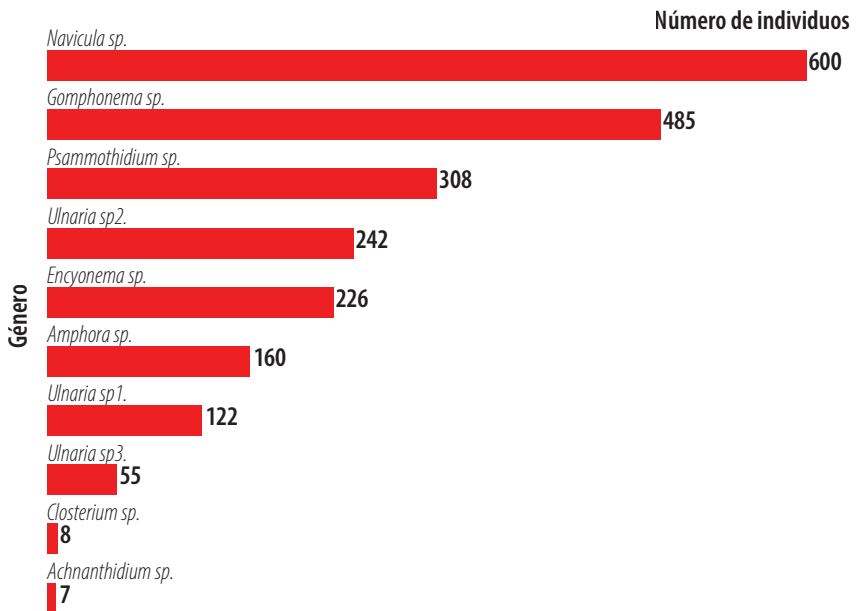


Figura 5. Abundancia de comunidades fotosintéticas río Yacuambi, cantón Yacuambi

En el río El Salado (Fig. 6), la mayor abundancia correspondió a los géneros *Microspora sp.* y *Ulothrix sp.*

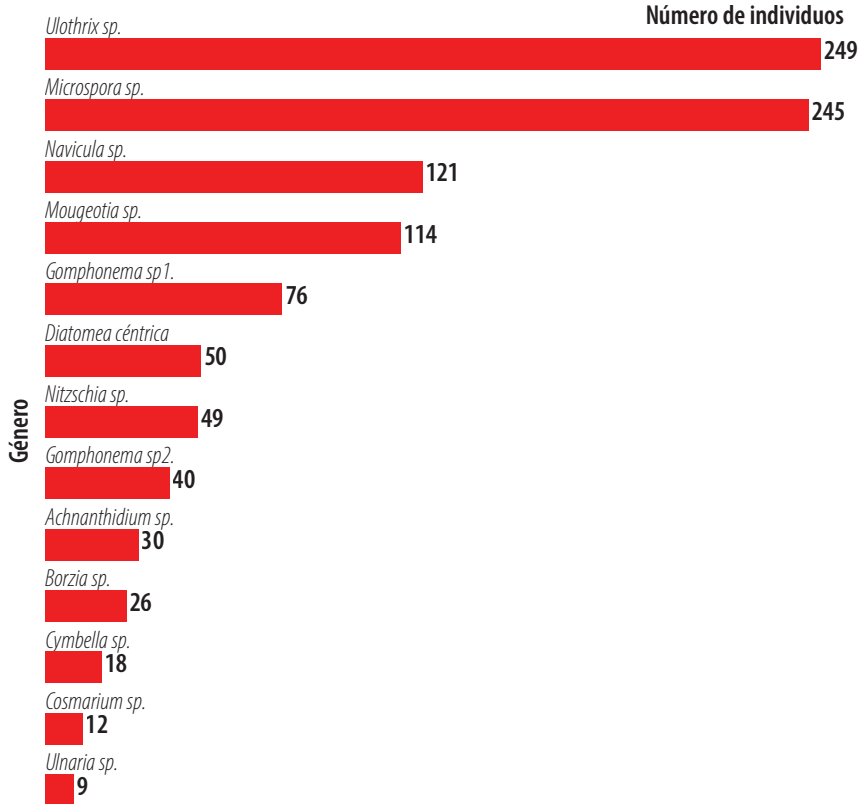


Figura 6. Abundancia de comunidades fotosintéticas río El Salado, cantón Yacuambi



La aplicación del Índice Diatómico General (IDG) reportó que, en la quebrada Santa Inés (Fig. 7), la calidad del agua se encuentra en una polución media con una eutrofización acentuada en la mayoría de los puntos monitoreados, a excepción del punto 5, sitio donde no se evidenció presencia de actividades ganaderas.

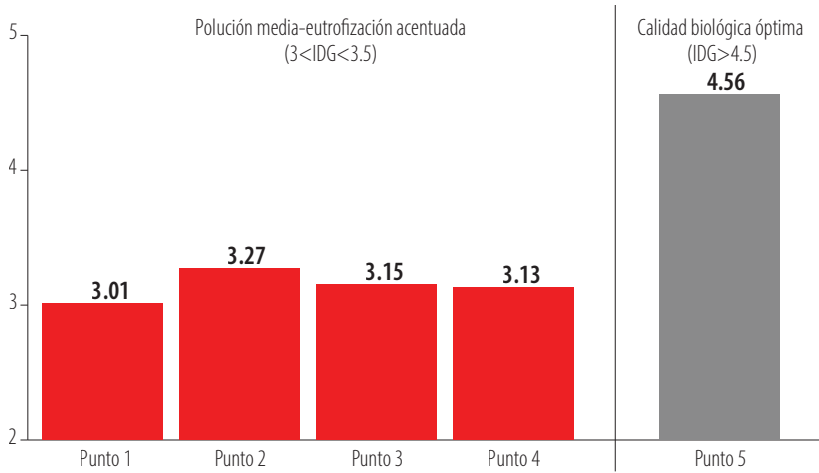


Figura 7. Índice Diatómico General quebrada Santa Inés, cantón Yacuambi

La calidad del río Yacuambi (Fig. 8), de acuerdo al IDG, se encuentra en una polución media con una eutrofización acentuada.

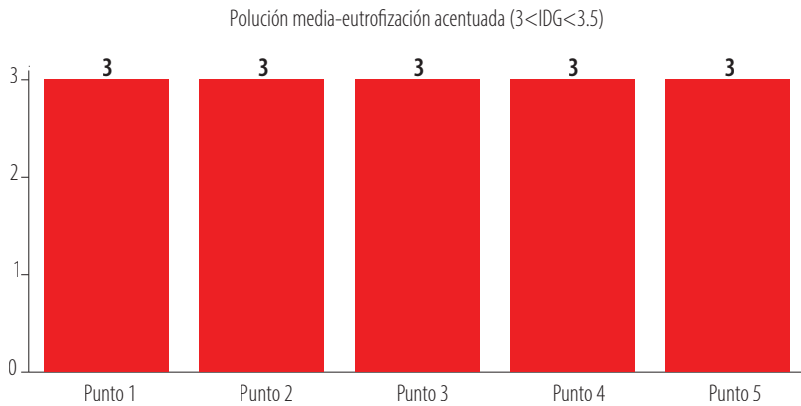


Figura 8. Índice Diatómico General río Yacuambi, cantón Yacuambi

Con respecto al río El Salado (Fig. 9), la calidad del agua se encuentra entre una polución intermedia a fuerte. Los puntos que presentan fuerte polución, están ubicados en un área de mayor intervención minera, actividad que gravemente ha alterado el ecosistema.

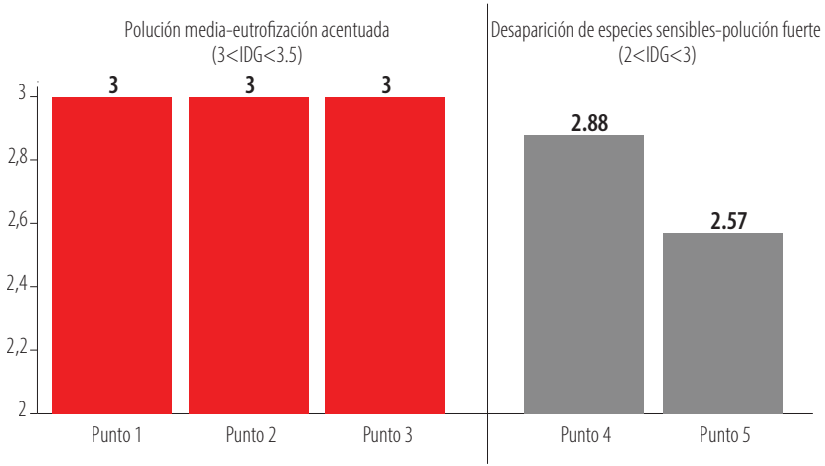


Figura 9. Índice Diatómico General río El Salado, cantón Yacuambi

En el análisis de los valores promedios de variables fisicoquímicas, se encontró una diferencia estadísticamente significativa en los niveles de temperatura ($p < 0.05$) entre las tres zonas de estudio. El río Yacuambi registró la temperatura más alta, seguido del río El Salado y la quebrada Santa Inés (Fig. 10).

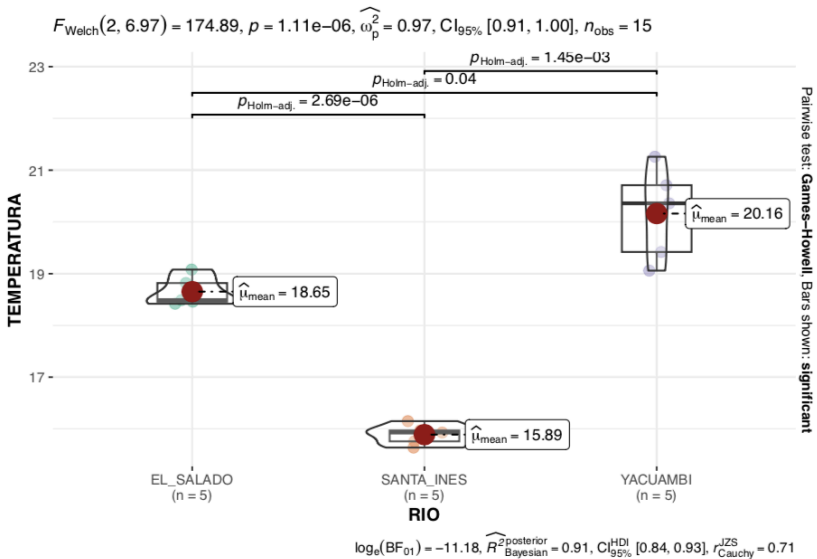


Figura 10. ANOVA paramétrico de la temperatura en la quebrada Santa Inés, río Yacuambi y río el Salado, cantón Yacuambi



En cuanto al oxígeno disuelto (Fig. 11), se encontraron diferencias estadísticamente significativas en las tres zonas de estudio ($p < 0.05$). La quebrada Santa Inés presentó la mayor concentración a diferencia del resto de zonas estudiadas.

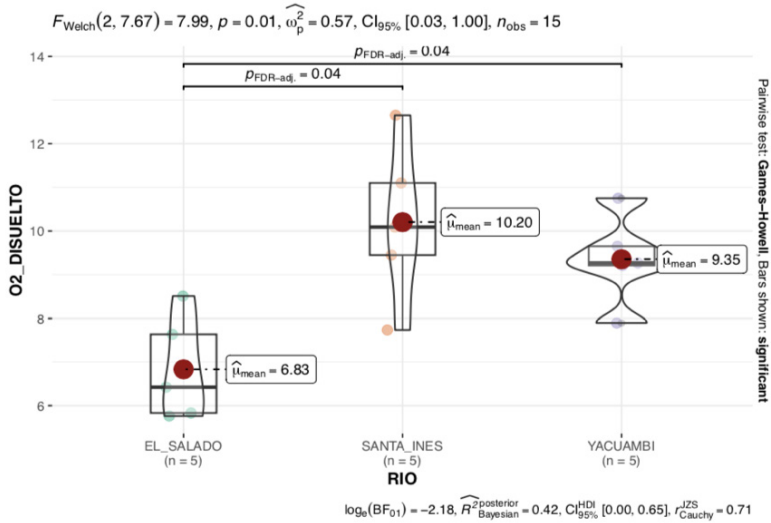


Figura 11. ANOVA paramétrico del oxígeno disuelto en la quebrada Santa Inés, río Yacuambi y río el Salado.

Los valores de conductividad eléctrica (Fig. 12) presentaron diferencias estadísticamente significativas en las zonas estudiadas ($p < 0.05$). La quebrada Santa Inés registró el mayor nivel de conductividad, seguida del río Yacuambi y río El Salado.

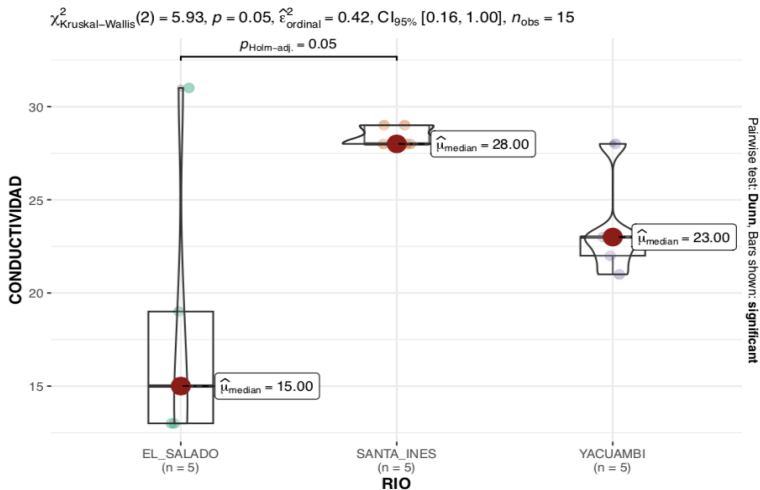


Figura 12. ANOVA no paramétrico de la conductibilidad en la quebrada Santa Inés, río Yacuambi y río el Salado, cantón Yacuambi



El Índice Diatómico General (IDG) (Fig. 13) mostró diferencias en los cuerpos de agua estudiados ($p < 0.05$). La quebrada Santa Inés reflejó un mayor nivel de IDG seguido por el río Yacuambi y El Salado.

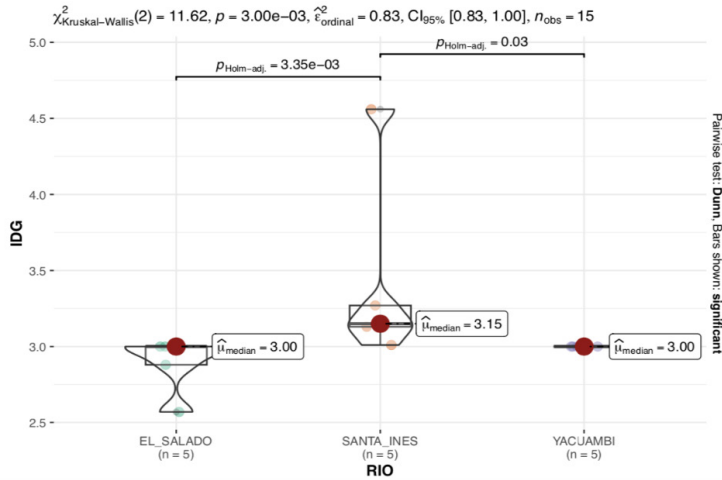


Figura 13. ANOVA no paramétrica del IDG en la quebrada Santa Inés, río Yacuambi y río el Salado.

En el Análisis de Componentes Principales (ACP) de la quebrada Santa Inés (Fig. 14), el primer componente principal (CP1) explica el 42.8 % del total de la varianza obtenida, influenciada principalmente por las variables de "riqueza" y "diversidad". El segundo componente principal (CP2) representa el 27.7 % de la varianza, asociada a la presencia de organismos como "*Planothidium lanceolatum*" y "*Gomphonema sp1*". En general, el 70.4 % del total de la varianza observada es explicado por los dos componentes principales.

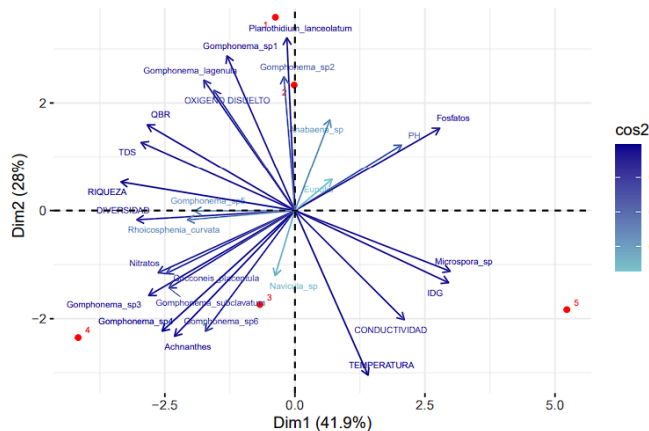


Figura 14. Análisis de componentes principales entre variable bióticas y géneros de diatomeas en la quebrada Santa Inés, cantón Yacuambi



En la Figura 15, se puede observar la variabilidad explicada para cada componente principal de la quebrada Santa Inés.

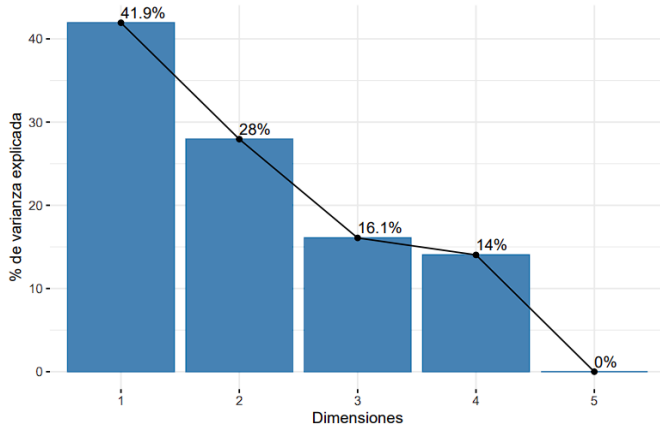


Figura 15. Variabilidad para cada componente principal de la quebrada Santa Inés

Con respecto al río Yacuambi (Fig. 16), el primer componente principal (CP1) explica el 63.1 % de la varianza total, la cual se debe por la abundancia del género “*Gomphonema*”. El segundo componente principal (CP2) representa el 23.2 % de la varianza, en donde, se destacan los géneros: “*Encyonema*” y “*Ulnaria sp2*” como los más representativos. En general, el 86.3 % del total de la varianza observada es explicado por los dos componentes principales.

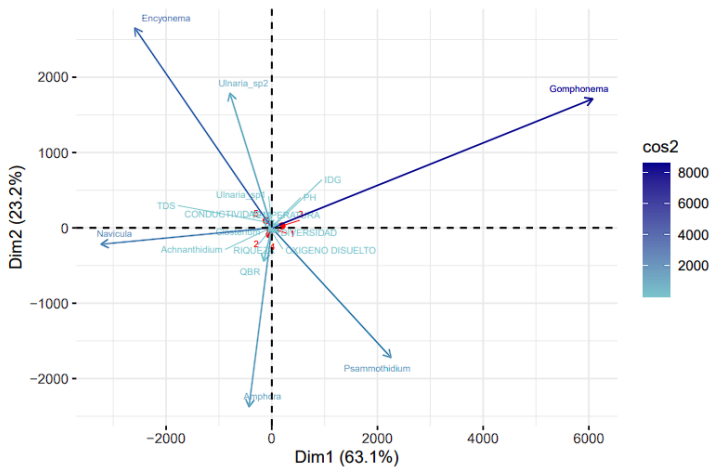


Figura 16. Análisis de componentes principales entre variables bióticas y géneros de organismos fotosintéticos en el río Yacuambi, cantón Yacuambi



En la Figura 17, se puede observar la variabilidad explicada para cada componente principal del Río Yacuambi.

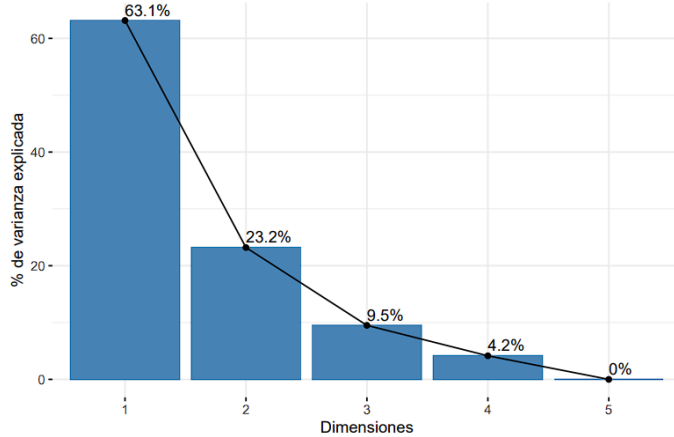


Figura 17. Variabilidad para cada componente principal del Río Yacuambi

El Análisis de Componentes Principales del río El Salado (Fig. 18) el primer componente principal (CP1) explica el 37.4 % del total de la varianza obtenida, influenciado por las variables: “navicula” y “riqueza”. El segundo componente principal (CP2) explica el 32 % del total de la varianza total, asociado principalmente a las variables “temperatura”, “oxígeno disuelto” y “Sólidos Totales Disueltos (TDS)”. En general, el 69.4 % del total de la varianza observada es explicado por los dos componentes principales.

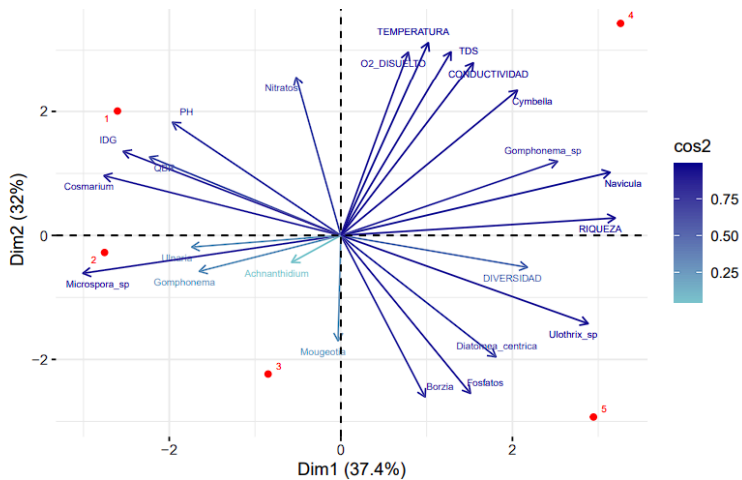


Figura 18. Análisis de componentes principales entre variables bióticas y géneros de organismos fotosintéticos en el río el Salado, cantón Yacuambi

En la Figura 19, se puede observar la variabilidad explicada para cada componente principal del río El Salado.

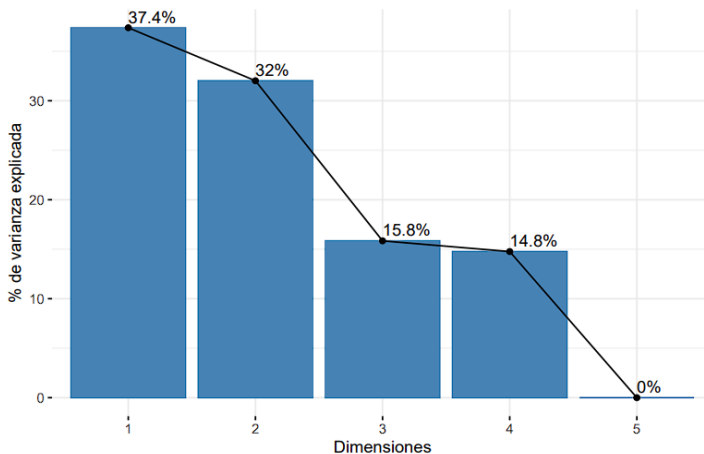


Figura 19. Variabilidad para cada componente principal del Río El Salado

DISCUSIÓN

La evaluación de la calidad del bosque de ribera permitió evidenciar el impacto de la minería artesanal no regulada en la vegetación ribereña, donde los ríos Yacuambi y El Salado mostraron zonas de mala calidad riparia, a diferencia de la quebrada Santa Inés, que presentó una calidad intermedia. Según Cabo et al. [19], la vegetación ribereña juega un papel importante en la calidad del agua, ya que actúa como una barrera fisicoquímica que retiene contaminantes y nutrientes. Además, un estado saludable de la vegetación ribereña proporciona sombra que regula la temperatura y mantiene una buena oxigenación [20]. Estas condiciones podrían explicar el desarrollo de ciertos grupos de comunidades fotosintéticas indicadoras de una buena calidad de agua. Por lo tanto, el índice QBR es una herramienta rápida que permite determinar el estado de la calidad de ribera [2], misma que puede estar vinculada a la calidad del agua.

El uso de comunidades de diatomeas para evaluar la calidad del agua influenciada por actividades mineras resulta eficaz debido a la tolerancia de estos organismos a los cambios de las condiciones de pH, conductividad, requerimientos de oxígeno y presencia de nutrientes [15]. Los fosfatos en la quebrada Santa Inés y el río El Salado superaron los límites permisibles (>0,01 mg/L) según los *Criterios Ecológicos de Calidad de Agua propuestos en México* [21]. Investigadores como Maza [22], indican que el aumento de fosfato es el resultado del desarrollo de actividades agrícolas y ganaderas, las cuales aportan nutrientes en la columna de agua. Por otro lado, Cabo et al. [19], mencionan que el aumento de nutrientes como el fosfato, puede ser el resultado de la destrucción de la vegetación ribereña, en este caso por la actividad minera, debido a que esta vegetación actúa como una barrera fisicoquímica que retiene contaminantes y regula la entrada de nutrientes a los cuerpos de agua.



En Ecuador, la minería artesanal ha generado un aumento de la contaminación en sectores cercanos a ríos o afluentes [23]. Para investigadores como Sánchez y Ortiz [24], el desarrollo de la minería trae consigo problemas ambientales, mismos que desencadenan conflictos socioambientales. En la actualidad, los ríos Yacuambi y El Salado enfrentan situaciones de contaminación por actividades mineras sin precedentes, intervenciones que han ocasionado conflictos socioambientales entre miembros de las comunidades, y además, han alterado las condiciones ecológicas y de funcionalidad ecosistémica de los cuerpos de agua y zonas riparias.

Las actividades mineras no reguladas constituyen un problema para el medio ambiente, pues la inadecuada disposición de los relaves, aguas residuales y desmontes causan filtraciones de drenaje ácido y contaminantes (metales pesados) en cuerpos acuáticos, que afectan a la diversidad biológica [4]. Según Bonnineau et al. [25], la incorporación excesiva de nutrientes y metales pesados a los cuerpos acuáticos afecta la composición del fitoplancton, donde las diatomeas presentan géneros teratológicos, es decir, organismos con deformaciones en los frústulos, por lo que es necesario considerar estas deformaciones al evaluar la calidad del agua en los ríos Yacuambi y El Salado. La diversidad de organismos fotosintéticos responde a ciertas condiciones ambientales que determinan su distribución y abundancia en la columna de agua, entre las cuales se encuentran el tipo de sustrato, el drenaje del sistema, la luz y la concentración de nutrientes [26]. Además, Alave-Choque [27] menciona que una alta diversidad de organismos fotosintéticos puede determinar una buena calidad de agua. Los resultados de esta investigación demuestran que existe una mayor diversidad de diatomeas en la quebrada Santa Inés y, por lo tanto, una mejor calidad de agua en comparación con los ríos Yacuambi y El Salado.

En un estudio de calidad de agua con organismos fitoplanctónicos en el río Chicama, Perú [5], se evidenció que un sistema acuático bajo la presión de la contaminación se caracteriza por presentar un bajo número de especies con un gran número de individuos, contrastando con una comunidad sin perturbaciones antrópicas, la cual presenta una alta diversidad de especies con un bajo número de individuos. Con base en lo anterior, la diversidad y la riqueza de fitoplancton influenciada por actividades mineras en los ríos Yacuambi y El Salado fue menor en comparación a la quebrada Santa Inés, la cual sirvió de referencia para el desarrollo de esta investigación, debido a que esta microcuenca es el punto de captación de agua para la población de Yacuambi, la cual se encuentra intervenida por la presencia de actividades agropecuarias.

El Índice Diatómico General (IDG) resulta un método eficiente que permite determinar las perturbaciones ambientales en un ecosistema acuático mediante la identificación a nivel de género de diatomeas [28]. En esta investigación, el IDG determinó una contaminación media con una eutrofización acentuada en la mayoría de los puntos de monitoreo. Sin embargo, el río El Salado presentó dos puntos de monitoreo con una contaminación fuerte, reflejando la desaparición de especies tolerantes a la contaminación, por lo que este río sería el más afectado por las actividades mineras, siendo necesaria la constante evaluación de su calidad de agua, estudiando parámetros fisicoquímicos que incluyan metales pesados como mercurio, plomo, arsénico, entre otros, y la identificación a nivel de especies para mejorar las evaluaciones biológicas.



El Análisis de Componentes Principales (ACP) en la quebrada Santa Inés evidenció que existe una relación positiva entre la diversidad y la riqueza de comunidades fotosintéticas, propiciando el desarrollo de organismos como *Planothidium lanceolatum*. En un estudio del valor indicador de las comunidades de algas bentónicas en el río Magdalena, en México [29], se describe a la especie *Planothidium lanceolatum* como un bioindicador de condiciones oligotróficas, es decir, sus organismos se desarrollan en mayor cantidad en ambientes con bajas concentraciones de nutrientes, por lo tanto, es un indicador de una buena calidad ambiental. En el río Yacuambi, el ACP revela la importancia del género *Gomphonema*, cuyo desarrollo se ve favorecido por el aumento de la concentración de nutrientes [30], por ende, tienden a formar grandes colonias. Por otro lado, en el río El Salado el ACP muestra que el género *Navicula* es tolerante a la contaminación orgánica [29]. Además, Passy [31], clasifica a *Navicula* como un organismo adaptado a ambientes turbulentos y altas concentraciones de nutrientes, como nitratos y fosfatos, lo que favorece su proliferación.

De acuerdo con los resultados generados en esta investigación, es necesario establecer programas de monitoreo de calidad de agua que incluyan mediciones periódicas a lo largo del tiempo, de manera consistente y en intervalos regulares, para recopilar datos confiables y detectar posibles cambios en la calidad del agua. Para ello, se debe tomar en cuenta la ubicación específica de las operaciones mineras y las fuentes potenciales de contaminación en el área, lo cual permitirá enfocar esfuerzos de monitoreo en las zonas más críticas y evaluar los posibles impactos causados por la actividad minera en las aguas cercanas.

CONCLUSIONES

La evaluación de la calidad de agua fundamentada en bioindicadores (organismos fotosintéticos) y otros parámetros fisicoquímicos posibilitó determinar una línea base en torno a las condiciones de salud biológica de cuerpos de agua amenazados por presiones antrópicas, como herramienta para el monitoreo y control permanente de su estado ecológico, en la que puedan participar entidades competentes y miembros de las comunidades. Los resultados de esta investigación posibilitan determinar las condiciones de calidad de agua en ríos con diferente grado de intervención antrópica.

De acuerdo con el nivel de conservación, la quebrada Santa Inés presenta mejores condiciones de calidad de agua que el resto de cuerpos hídricos estudiados. Sin embargo, la mayoría de los puntos reflejan indicios de una eutrofización acentuada, atribuida principalmente a las altas concentraciones de nutrientes (fosfatos y nitratos), resultado de las actividades ganaderas en las zonas ribereñas. Por otro lado, los ríos Yacuambi y El Salado muestran impactos significativos derivados de las actividades mineras, lo cual se refleja en la evaluación de la calidad del agua mediante bioindicadores como mecanismo complementario a la evaluación fisicoquímica.

Por lo tanto, el uso de comunidades de diatomeas como bioindicadores de la calidad del agua es un factor clave para la toma de decisiones informadas basadas en datos ecológicos concretos. Esta investigación permitió que la ciudadanía y las autoridades conozcan y evalúen las condiciones de calidad de agua de los ríos más importantes en los que se realizan actividades mineras, de manera que es imperante plantear que los planes y programas de desarrollo del cantón Yacuambi contemplen la necesidad de



estudiar e implementar programas de monitoreo del estado de salud de los recursos hídricos de forma permanente, así como proyectos de restauración y recuperación de las áreas destruidas.

AGRADECIMIENTOS

Nuestro agradecimiento a COMUNIDEC Fundación de Desarrollo y a la Dirección de Investigación de la Universidad Nacional de Loja por el financiamiento de esta investigación. Al Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del cantón Yacuambi por su colaboración y acompañamiento en el reconocimiento de las zonas para el monitoreo y al Laboratorio de Ecología Acuática de la Universidad Técnica Particular de Loja por brindarnos el espacio y las condiciones necesarias para llevar a cabo la fase de laboratorio de este proyecto.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

Conceptualización: Alonso Cartuche

Metodología: Alonso Cartuche, Roberth Yaguana y Josselyn Balcazar

Recopilación de datos: Roberth Yaguana y Josselyn Balcazar

Análisis formal: Alonso Cartuche, Nikolay Aguirre, Max Encalada y Vinicio Alvarado

Análisis e interpretación de datos: Roberto Bustillos y Alonso Cartuche

Redacción, revisión y edición: Alonso Cartuche, Roberth Yaguana, Nikolay Aguirre y Vinicio Alvarado

DECLARACIÓN SOBRE EL USO DE TECNOLOGÍAS DE IA GENERATIVA Y ASISTIDA EN LA REDACCIÓN

La elaboración de este trabajo no requirió el uso de Inteligencia Artificial (IA).

DECLARACIÓN DE DISPONIBILIDAD DE DATOS

Los datos de esta investigación están disponibles previa solicitud al autor correspondiente, en casos excepcionales.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores manifiestan que no existe conflicto de intereses en este trabajo de investigación. Todos los autores han aprobado y autorizan su publicación.

REFERENCIAS

- [1] Larreal-Murell, J.A., Rojas-Badía, M.M., y Romeu-Álvarez, B., Rojas-Hernández, N. M., & Heydrich-Pérez, M. (2013). Bacterias indicadoras de contaminación fecal en la evaluación de la calidad de las aguas: revisión de la literatura. *Revista CENIC. Ciencias Biológicas*, 44(3), 24-34. <https://www.redalyc.org/pdf/1812/181229302004.pdf>
- [2] Stulzer, E. F., Villalobos-Sand, N., Castro, L. P., & Schulz, C. (2017). Evaluación breve de la presencia de diatomeas y su relación con algunos parámetros físico-químicos en el río Pirro, Heredia, Costa Rica. *Uniciencia*, 31(2), 99-109. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6067684>
- [3] Calizaya-Anco, J., Avendaño-Cáceres, M., & Delgado-Vargas, I. (2013). Evaluación de la calidad del agua fluvial con diatomeas (Bacillariophyceae), una experiencia en Tacna, Perú. *Revista peruana de medicina experimental y salud pública*, 30, 58-63. <https://www.scielosp.org/pdf/rpmesp/2013.v30n1/58-63/es>
- [4] Franco, P., Franco, P., Sulca, L., y Oyague, E. (2018). Diatomeas teratológicas como organismos bioindicadores de la calidad del agua del río tingo, Hualgayoc, Cajamarca. *Ciencia y Desarrollo*, 17(1), 26-33.
- [5] Santillán-Aredo, S. R. y Guerrero-Padilla, A. M. (2018). Macroinvertebrados y fitoplancton como bioindicadores de contaminación en la cuenca del río Chicama, Perú. *Revista Tecnología en Marcha*, 31(4), 97-110. <https://doi.org/10.18845/tm.v31i4.3968>
- [6] López-Rodríguez, M. C., Leira, M., Valle, R., y Moyá-Niell, G. (2016). El fitoplancton como indicador de calidad de masas de agua muy modificadas en la DMA. El lago artificial de As Pontes (A Coruña, España). *NACC: Nova acta científica compostelana. Biología*, 23, 8. <https://portalinvestigacion.udc.gal/documentos/5d1df6ee29995204f767cd2e>
- [7] Loza, S., Benavides, R., Brenes, C., y Ballestero, D. (2018). Estructura del fitoplancton en las épocas seca y lluviosa en el golfo de Papagayo, Costa Rica. *Revista de Ciencias Marinas y Costeras*, 10 (2). <https://doi.org/10.15359/revmar.10-2.1>
- [8] Potapova, M. G. y Charles, D. F. (2002). Benthic diatoms in USA rivers: distributions along spatial and environmental gradients. *Journal of biogeography*, 29(2), 167-187. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2699.2002.00668.x>
- [9] Berlino, M., Mangano, M. C., Di Bona, G., Lucchese, M., Terzo, S. M. C., De Vittor, C., D'Alessandro, M., Esposito, V., Gambi, M. C., Del Negro, P., & Sarà, G. (2024). Functional diversity and metabolic response in benthic communities along an ocean acidification gradient. *Marine Environmental Research*, 198, 106520. <https://doi.org/10.1016/j.marenres.2024.106520>
- [10] Rumeau, A. y Coste, M. (1988). Initiation à la systématique des diatomées d'eau douce. Pour l'utilisation pratique d'un indice diatomique générique. *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*, (309), 1-69. <https://doi.org/10.1051/kmae:1988009>
- [11] GADM de Yacuambi. (2019). *Plan de desarrollo y ordenamiento territorial del cantón Yacuambi 2019-2023*. https://gadyacuambi.gob.ec/images/2021/LOTAIP2021/PDYOT_2019_2023_TOMOI_final_2021.pdf
- [12] Guailas, M. (2015). *Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del cantón Yacuambi*. <https://es.scribd.com/document/442317687/Diagnostico-por-componentes-canton-Yacuambi>
- [13] López, E., Vásquez-Ramos, J., Villa-Navarro, F., y Reinoso-Florez, G. (2015). Evaluación de la calidad del bosque de ribera, utilizando un método simple y rápido en dos ríos de bosque seco tropical (Tolima, Colombia). *Tumbaga*, 1(10), 1. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5644630>
- [14] Munné, A., Prat, N., Solà, C., Bonada, N., y Rieradevall, M. (2003). A simple field method for assessing the ecological quality of riparian habitat in rivers and streams: QBR index. *Aquatic conservation: marine and freshwater ecosystems*, 13(2), 147-163. <https://doi.org/10.1002/aqc.529>
- [15] Lobo, EA, Heinrich, CG, Schuch, M., Wetzel, CE, Ector, L. (2016). Diatomeas como bioindicadores en ríos. En: Necchi JR, O. (eds.) *Algas fluviales. Springer, Cham*. https://doi.org/10.1007/978-3-319-31984-1_11
- [16] Guzman, B. y Leiva, D. (2017). Diatomeas como bioindicadores para la evaluación de la calidad del agua en la cuenca del río Utcubamba, Amazonas - Perú. *Revista Científica UNTRM Ciencias Naturales e Ingeniería*, 2(1), 16. https://www.researchgate.net/publication/321204426_Diatomeas_como_bioindicadores_para_la_evaluacion_de_la_calidad_del_agua_en_la_cuenca_del_rio_Utcubamba_Amazonas_-_Peru
- [17] McAlice, B. J. (1971). Phytoplankton sampling with the Sedgewick- Rafter Cell. *Limnology and Oceanography*, 16(1), 19-28. https://www.academia.edu/3259035/Phytoplankton_sampling_with_the_Sedgewick-Rafter_cell

- [18] Vargas, E. C. (2014). *Análisis taxonómico de las principales especies de diatomeas (Bacillariophyceae) en seis sitios en la cuenca del río Sarapiquí, Heredia, Costa Rica* [Tesis doctoral, Universidad de Costa Rica]. https://www.academia.edu/11706400/An%C3%A1lisis_taxon%C3%B3mico_de_las_principales_especies_de_diatomeas_Bacillariophyceae_en_seis_sitios_en_la_cuenca_del_r%C3%ADo_Sarapiqu%C3%AD_Heredia_Costa_Rica <http://www.biologia.ucr.ac.cr/TesisLic/EdwinCespedesVargas.pdf>
- [19] Cabo, L., Faggi, A., Miguel, S., y Basílico, G. (2019). Rehabilitación de las riberas de un sitio de la cuenca baja del río Matanza-Riachuelo. *Biología Acuática*, 33. <https://doi.org/10.24215/16684869e005>
- [20] Elozegi, A. y Sabater, S. (2009). *Conceptos y técnicas en ecología fluvial*. Fundación BBVA. https://www.fbbva.es/wp-content/uploads/2017/05/dat/DE_2009_conceptos_ecologia_fluvial.pdf
- [21] Centro de Calidad Ambiental. (1989). *Acuerdo por el que se establecen los criterios ecológicos de calidad del agua CE-CCA-001 / 89*. <http://legismex.mty.itesm.mx/acu/acca001.pdf>
- [22] Maza, J. (2017). *Cuantificación de la variabilidad espacial y temporal de iones de fosfato en dos cuencas andinas altas del sur del Ecuador* [Tesis de pregrado, Universidad Politécnica Salesiana]. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/14968/1/UPS-CT007384.pdf>
- [23] Oviedo-Anchundia, R., Moína-Quimí, E., Naranjo-Morán, J., & Barcos-Arias, M. (2017). Contaminación por metales pesados en el sur del Ecuador asociada a la actividad minera. *Bionatura*, 2, 437-441. <https://doi.org/10.21931/RB/2017.02.04.5>
- [24] Sanchez, E. y Ortiz, L. (2016). Escenarios ambientales y sociales de la minería a cielo abierto. *Inventio, la génesis de la cultura universitaria en Morelos*. <https://inventio.uaem.mx/index.php/inventio/article/view/323>
- [25] Morin, S., Cordonier, A., Lavoie, I., Arini, A., Blanco, S., Duong, T. T., Tornés, E., Bonet, B., Corcoll, N., Faggiano, L., Laviale, M., Pérès, F., Becares, E., Coste, M., Feurtet-Mazel, A., Fortin, C., Guasch, H. & Sabater, S. (2012). Consistencia en la respuesta de las diatomeas a entornos contaminados con metales. En H. Guasch, A. Ginebreda y A. Geislinger (Eds.), *Contaminantes emergentes y prioritarios en ríos (The Handbook of Environmental Chemistry, vol. 19)*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-25722-3_5
- [26] Cajamarca-Tovar, N., Gaona-Castro, L. N., Jimenez-Vargas, N., Acosta-Salinas, M. I., & Camargo-Cortes, L. (2021). Diversidad de Perifiton como indicador de calidad de agua en Caño Barandas, Reserva Natural El Diamante de las Aguas, Guaviare, Colombia. *Revista de la Asociación Colombiana de Ciencias Biológicas*, 143-153. <https://doi.org/10.47499/revistaaccb.v1i33.243>
- [27] Alave-Choque, H. (2018). Evaluación del perifiton como indicador de calidad de agua en el embalse Cerro Blanco de la Empresa Prestadora de Servicios de Tacna. https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UNJB_647cc7dc2ce4ed6a87084204024dcf0e
- [28] Baylón, M., Arias, J., Cárdenas, R., Arias, C., Cárdenas, A., & Castillo, R. (2018). Evaluación de la diversidad de algas fitoplanctónicas como indicadores de la calidad del agua en lagunas altoandinas del departamento de Pasco (Perú). *Ecología Aplicada*, 17(1), 119. http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1726-22162018000100013
- [29] Carmona Jiménez, J., Ramírez Rodríguez, R., Bojorge-García, M. G., González Hidalgo, B., & Cantoral-Uriza, E. A. (2016). Estudio del valor indicador de las comunidades de algas bentónicas: Una propuesta de evaluación y aplicación en el río Magdalena, Ciudad de México. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 32(2). <https://doi.org/10.20937/RICA.2016.32.02.01>
- [30] Palmer, C. M. (1969). A composite rating of algae tolerating organic pollution. *Journal of phycology*, 5(1), 78-82. <https://doi.org/10.1111/j.1529-8817.1969.tb02581.x>
- [31] Passy, S. (2007). Diatom ecological guilds display distinct and predictable behavior along nutrient and disturbance gradients in running waters. *Aquatic Botany*, 86(2), 171-178. <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2006.09.018>

First predation record of the Galapagos Hawk *Buteo galapagoensis* (Accipitriformes: Accipitridae), on a feral cat *Felis catus* (Carnivora: Felidae)

Elias Viteri-Basso^{1*}, Johannes Ramirez Kastdalen², Jorge Carrión-Tacuri^{3,4}

¹ Universidad San Francisco de Quito USFQ, Colegio de Ciencias Biológicas y Ambientales, Instituto de Biodiversidad Tropical IBIOTROP, Laboratorio de Zoología Terrestre, Quito 170901, Ecuador

² Dirección del Parque Nacional Galápagos, Santa Cruz, Galápagos, Ecuador

³ Fundación Conservando Galápagos, Santa Cruz, Galápagos, Ecuador

⁴ Galápagos Conservancy, Washington DC, USA

*Autor para correspondencia/Corresponding author: eliasaviteri@gmail.com

Primer registro de depredación del gavián de Galápagos *Buteo galapagoensis* (Accipitriformes: Accipitridae), sobre un gato feral *Felis catus* (Carnivora: Felidae)

Abstract

The Galapagos Hawk *Buteo galapagoensis* is the top predator of the archipelago, feeding on a wide variety of species from different taxonomic groups, ranging from insects to carrion. We report the first recorded instance of predation by a Galapagos Hawk on a feral cat *Felis catus*, as camera trap bycatch, on Wolf Volcano, Isabela Island. This report adds to the extensive list of the hawk's dietary items and may have ecological implications, such as the role of introduced species in food webs, the role of native predators in controlling invasive species, and how these interactions play out on islands, leaving many open questions.

Keywords: Galapagos Islands, introduced species, food webs, top predator, camera traps, invasive species, Accipitridae, raptor, Isabela Island, Wolf Volcano

Resumen

El gavián de Galápagos *Buteo galapagoensis* es el depredador tope del archipiélago, alimentándose de una gran cantidad de especies de varios grupos taxonómicos, desde insectos hasta carroña. Reportamos el primer evento de depredación de un gavián de Galápagos sobre un gato feral *Felis catus*, como captura incidental de un proyecto de cámaras trampa, en el Volcán Wolf, isla Isabela. El reporte contribuye a una gran lista de ítems de dieta del gavián, y puede tener implicaciones ecológicas como el rol de especies introducidas en cadenas tróficas, el rol de depredadores nativos en el control de especies invasoras, y cómo estas interacciones se dan en islas, dejando muchas preguntas abiertas.

Palabras clave: Islas Galápagos, especies introducidas, cadenas tróficas, depredador tope, cámaras trampa, especies invasoras, Accipitridae, rapaz, isla Isabela, Volcán Wolf



Licencia Creative Commons
Atribución-NoComercial 4.0



Editado por /
Edited by:
Mateo Dávila-Játiva

Recibido /
Received:
24/04/2025

Aceptado /
Accepted:
09/07/2025

Publicado en línea /
Published online:
21/11/2025



The Galapagos Hawk *Buteo galapagoensis* is the only native bird of prey of the Galapagos Islands. It is a diurnal, top predator with breeding populations currently found on eight islands, including Española, Santa Fe, Pinzon, Santiago, Isabela, Fernandina, Marchena, and Pinta; it was extirpated from the islands of Santa Cruz, San Cristobal, Floreana, and Baltra mainly because of hunting pressure, habitat changes, and food scarcity attributed to introduced species [1,2,3,4,5]. It is a social species, forming polyandric groups and actively defending territory, which is usually dry, open ecosystems close to shore, but also reaching Galapagos' highest points, such as Wolf Volcano [3,4,6,7].

This island endemic is a broad generalist, known to consume more than 30 different species from diverse groups. Its diet items include native and introduced rodents [1,8], reptiles, and a great array of bird prey. These range from marine birds such as boobies *Sula* spp., gulls *Creagrus furcatus*, petrels *Hydrobates* and *Pterodroma* spp., to the juveniles and chicks of pelicans *Pelecanus occidentalis*, penguins *Spheniscus mendiculus*, and flightless cormorants *Nannopterum harrisi*. Inland bird prey includes Galapagos finches *Geospiza* spp., mockingbirds *Mimus* spp., tyrant flycatchers (family Tyrannidae), and even the Galapagos Short-eared Owl *Asio flammeus galapagoensis* [1,2,9,10,11]. Reptile prey is common and includes marine iguanas *Amblyrhynchus cristatus*, land iguanas *Conolophus* spp., lava lizards *Microlophus* spp., Galapagos racer snakes *Pseudalsophis* spp., and even recently hatched turtles. Its diet also expands to fish, invertebrate prey, and carrion and placentas from many animals including sea lions *Zalophus wollebaeki*. As a very versatile predator, this hawk hunts, eats carrion, and even steals food from other birds [1,12], making it an adaptable opportunistic-generalist that has also found its way around introduced prey items. Its prey preferences change depending on group, habitat occupied, phenology, and seasonality [1].

Feral cats have been a growing problem on the Galapagos Islands, where they compete with native predators and prey upon and decimate populations of many native land species such as rodents, lizards, and birds, as well as marine bird nests and iguana nests [13,14,15]. They pose a significant threat to ecosystems on all islands where they are found. Although various control strategies have been implemented across the archipelago, eradication efforts remain a challenging and ongoing task on many islands, made more difficult given the fact that cats do not have any predators on the islands [16,17]. However, and despite the vast understanding of Galapagos Hawk diet items and predatory behavior, we present the first documented record of an individual hawk preying upon a feral cat *Felis catus*, on Wolf Volcano, Isabela Island, as camera trap bycatch data.

Isabela is the largest island in the Galapagos archipelago, as well as the most volcanically active, formed by six shield volcanoes—five of them active with eruptions recorded in the last 50 years: Wolf, Darwin, Alcedo, Sierra Negra, and Cerro Azul. Ecuador Volcano is the only one not currently active [18]. Its landscape is very diverse, with various ecosystems across its 4,670 km², including mangroves, dry shrub forests, humid forests, and barren lava flows [19]. Around 2,000 people inhabit Isabela Island permanently, and many introduced animals such as dogs, cats and rats threaten the local fauna and decimate populations [13,20]. Wolf Volcano in particular (Fig. 1) is located in the north of the island, on the equator. It is special because its northwestern slopes are home to the endemic Galapagos Pink Iguana *Conolophus marthae*, a recently described species considered critically endangered because of its restricted range and threats from invasive species, especially feral cats [21,22,23].

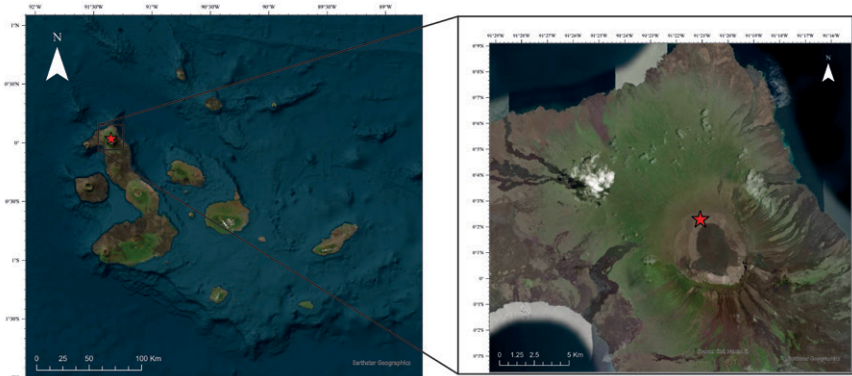


FIGURE 1. Map of the Galapagos Islands, Ecuador, with zoom in to Wolf Volcano, Isabela Island. Red star represents the location where first record of a Galapagos Hawk *Buteo galapagoensis* preying upon a feral cat *Felis catus* was taken by a camera trap.

For conservation purposes and monitoring Galapagos Pink Iguanas, a camera trap project was started in January 2022 with the primary objective of evaluating the actual demographics of the iguanas, identifying possible nesting areas, and determining the existence of active reproduction and recruitment within the population. This project was funded by the non-governmental organization Galápagos Conservancy and carried out in collaboration with the Galapagos National Park Directorate. During the monitoring phase, 53 Reconyx camera traps, model HyperFire 2, were set up in strategic places, covering the iguana's distribution area, on slopes, crests, and inside the volcano crater. Cameras were checked and pictures extracted every 20 days, one of which caught the predation event.

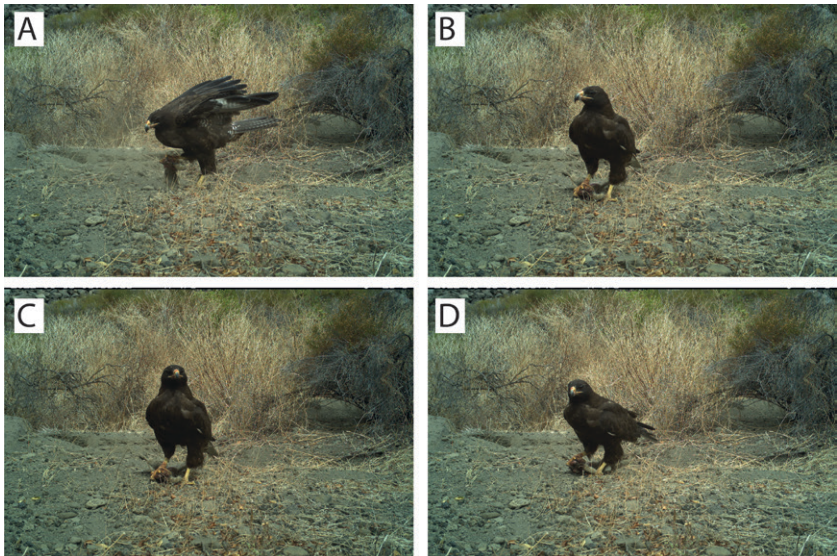


FIGURE 2. First record of a Galapagos Hawk *Buteo galapagoensis* preying upon a feral cat *Felis catus* on Wolf Volcano, Isabela Island, Galapagos, taken by a camera trap as bycatch data.



On the 18th of January, 2022, a Galapagos Hawk *Buteo galapagoensis* was pictured with a feral cat *Felis catus* in its right claw (Fig. 2). The event occurred at the northern slopes of Wolf Volcano (0°02'18.2"N 91°21'04.3"W), at an altitude of 1,234 m above sea level, on inclined ground. The prey item was identified as a cat based on its size, fur coloration, and the absence of any other similarly sized mammal species on the island. Distinct features such as legs, paws, and thick fur further supported this identification. The cat appears to be a juvenile based on size and is missing its head. The hawk has apparent blood marks on its beak and right claws, suggesting hunting included attacking the head (which is missing from the images). Overall, 10 pictures of the event were taken, where the hawk stands grabbing the cat tightly in its claws. It was the only event of this nature registered.

This record presents the first documented case of *Buteo galapagoensis* preying on a feral cat *Felis catus*, further highlighting the hawk's opportunistic and generalist feeding behavior and adding a previously unrecorded prey item to its extensive dietary repertoire that includes more than six mammalian prey. The availability of introduced prey species can provide important insights into ecosystem dynamics on the Galapagos Islands. Predation on an introduced predator such as a feral cat may have broader implications, potentially indicating a shift in the hawk's diet towards non-native species. However, given the hawk's highly opportunistic and idiosyncratic prey selection [1], this single event does not necessarily indicate a population-wide trend. Regardless, it does contribute to discussions on the ecological impacts of introduced species and their integration into native food webs. On some islands, such as Santiago, black rats have become the primary food source for the hawk following goat eradication [8]. With the addition of feral cats, the number of known introduced prey species in the hawk's diet now increases to five: small goats and goat carrion *Capra capra*, black rats *Rattus rattus*, mice *Mus musculus*, domestic poultry *Gallus* spp. [1,4], and now feral cats *Felis catus*. This opens discussions about the role of introduced species in supporting native predator diets and may present initial insights into the hawk's potential role in the ecological control of invasive cats or others, since the event shows a positive interaction towards the ecosystem, where cats threaten endangered species such as the critically endangered pink iguanas. This event highlights the potential but probably limited role of native predators in mitigating the impacts of invasive species, something that could complement ongoing conservation efforts. However, further research is needed to understand ecosystem resilience and inform cautious, scientific-based conservation strategies, as well as the importance of considering native predator responses in conservation efforts.

The observation raises several important ecological questions: Is the hawk's consumption of introduced species indicative of a dietary shift, or is it driven by the decline of native prey? Does the increasing abundance of invasive species such as feral cats simply raise the chances of such predation events? Is it also possible that such interactions have gone unrecorded due to the lack of monitoring in places where both species coincide? On Santa Cruz, San Cristóbal, and Floreana, hawks were extirpated primarily due to hunting and the depletion of food resources [1,2,5]. Introduced species played a significant role in this decline, as they contributed to the depletion of native food sources [6]. Considering this, while introduced species may now provide an alternative food source for the hawk, suggesting that they benefit them must be approached with caution, given their historical role in ecosystem disruption. While all of these questions remain unresolved, the observation does contribute with valuable insights not only into



the ecology of *B. galapagoensis*, but also into the broader dynamics of food webs in the Galapagos ecosystem. We highlight the need for further monitoring both cat and hawk populations on the islands. Further research is needed to determine whether events such as this one are isolated or part of a broader, emerging pattern that could influence invasive species management and predator-prey dynamics across the Galapagos.

ACKNOWLEDGEMENTS

We would like to thank Mgs. Danny Rueda Cordova and Dr. Luis Ortiz Catedral for their contributions to the Pink Iguana Conservation Program. We also thank Galápagos Conservancy for awarding the grant that made this project possible. Additionally, we are grateful to the Red Ecuatoriana de Herpetología (REH) for organizing the I Congreso Ecuatoriano de Herpetología, a place for collaboration and strengthening science in Ecuador, where the authors met and were able to share information and develop this manuscript.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Conceptualization: Elias Viteri-Basso (EVB); Data curation: Johannes Ramirez Kastdalen (JRK) and EVB; Formal analysis: EVB and JRK; Funding acquisition: Jorge Carrión-Tacuri (JCT) and JRK; Investigation: EVB; Methodology: JRK and EVB; Resources: JRK and JCT; Visualization: EVB; Writing-original draft: EVB; Writing-review and editing: EVB, JRK, and JCT.

DECLARATION OF GENERATIVE AND AI-ASSISTED TECHNOLOGIES IN THE WRITING PROCESS

For this work, the author(s) did not use generative or AI-assisted tools in the preparation of the manuscript; therefore, no such use is declared.

DATA AVAILABILITY STATEMENT

No data were used in this study.

CONFLICT OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

REFERENCES

- [1] de Vries, T. (2015). *The Galapagos hawk/El gavián de Galápagos*. Tundra Ediciones.
- [2] Harris, M. P. (1973). The Galápagos avifauna. *The Condor: Ornithological Applications*, 75(3), 265–278. <https://doi.org/10.2307/1366166>
- [3] de Vries, T. (1975). The breeding biology of the Galapagos Hawk, *Buteo galapagoensis*. *Le Gerfaut*, 65, 29–57.
- [4] Ferguson-Lees, J., & Christie, D. A. (2001). *Raptors of the world*. Houghton Mifflin Harcourt.
- [5] Bollmer, J. L., Kimball, R. T., Whiteman, N. K., Sarasola, J. H., & Parker, P. G. (2006). Phylogeography of the Galápagos Hawk (*Buteo galapagoensis*): A recent arrival to the Galápagos Islands. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 39(1), 237–247. <https://doi.org/10.1016/j.ympev.2005.11.014>
- [6] de Vries, T. (1989). Conservation, status and ecological importance of the Galapagos Hawk *Buteo galapagoensis*. In B. U. Meyburg & R. D. Chancellor (Eds.), *Raptors in the modern world*. World Working Group on Birds of Prey and Owls. http://www.raptors-international.org/book/raptors_in_the_modern_world/Vries_1989_327-330.pdf
- [7] Rivera-Parra, J. L., Levenstein, K. M., Bednarz, J. C., Vargas, F. H., Carrion, V., & Parker, P. G. (2012). Implications of goat eradication on the survivorship of the Galapagos Hawk. *Journal of Wildlife Management*, 76(6), 1197–1204. <https://doi.org/10.1002/jwmg.372>
- [8] Jaramillo, M., Donaghy-Cannon, M., Vargas, F. H., & Parker, P. G. (2016). The diet of the Galapagos Hawk (*Buteo galapagoensis*) before and after goat eradication. *Journal of Raptor Research*, 50(1), 33–44. <https://doi.org/10.3356/rapt-50-01-33-44.1>
- [9] Anderson, D. J. (1991). Apparent predator-limited distribution of Galápagos Red-footed Boobies *Sula sula*. *Ibis*, 133(1), 26–29. <https://doi.org/10.1111/j.1474-919X.1991.tb04805.x>
- [10] de Groot, R. S. (1983). Origin, status and ecology of the owls in Galapagos. *Ardea*, 71(2), 167–182.
- [11] Cruz, J. B., & Cruz, F. (1987). Conservation of the dark-rumped petrel *Pterodroma phaeopygia* in the Galapagos Islands, Ecuador. *Biological Conservation*, 42(4), 303–311. [https://doi.org/10.1016/0006-3207\(87\)90074-7](https://doi.org/10.1016/0006-3207(87)90074-7)
- [12] Kushlan, J. A. (2009). Foraging and plumage coloration of the Galapagos Lava Heron (*Butorides Striata* Sundevalli). *Waterbirds*, 32(3), 415–422. <https://doi.org/10.1675/063.032.0306>
- [13] Konecny, M. J. (1987). Food habits and energetics of feral house cats in the Galapagos Islands. *Oikos*, 50(1), 24–32. <https://doi.org/10.2307/3565398>
- [14] Dexter, N., Dowler R. C., Flanagan J. P., Sharelle, H., Revelez, M. A., Lee Jr, T. E. (2004) The influence of Feral Cats *Felis catus* on the distribution and abundance of introduced and endemic Galápagos rodents. *Pacific Conservation Biology*, 7(4), 210–215. <https://doi.org/10.1071/PC040210>
- [15] Carrión, P. L., & Valle, C. A. (2018). The diet of introduced cats on San Cristobal Island, Galapagos: Cat feces as a proxy for cat predation. *Mammalian Biology*, 90, 74–77. <https://doi.org/10.1016/j.mambio.2018.02.004>
- [16] Parkes, J., Fisher, P., Robinson, S., & Aguirre-Muñoz, A. (2014). Eradication of feral cats from large islands: An assessment of the effort required for success. *New Zealand Journal of Ecology*, 38(2), 307–314. <https://newzealandecology.org/system/files/articles/3129.pdf>
- [17] Phillips, R. B., Cooke, B. D., Campbell, K., Carrion, V., Marouez, C., & Snell, H. L. (2005). Eradicating feral cats to protect Galapagos land iguanas: Methods and strategies. *Pacific Conservation Biology*, 11(4), 257–267. <https://doi.org/10.1071/PC050257>
- [18] Banfield, A. F., Behre C. H., & St Clair, D. (1956). Geology of Isabela (Albemarle) Island, Archipiélago de Colón (Galapagos). *Geological Society of America Bulletin*, 67(2), 215–234. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1956\)68\[215:G01AIA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1956)68[215:G01AIA]2.0.CO;2)
- [19] Levy, J. K., Crawford, P. C., Lappin, M. R., Dubovi, E. J., Levy, M. G., Alleman, R., Tucker, S. J., & Clifford, E. L. (2008). Infectious diseases of dogs and cats on Isabela Island, Galapagos. *Journal of Veterinary Internal Medicine*, 22(1), 60–65. <https://doi.org/10.1111/j.1939-1676.2007.0034.x>



- [20] Kruuk, H., & Snell, H. (1981). Prey selection by feral dogs from a population of marine iguanas (*Amblyrhynchus cristatus*). *Journal of Applied Ecology*, 18(1), 197–204. <https://doi.org/10.2307/2402489>
- [21] Garizio, L., Gargano, M., Colosimo, G., Gratton, P., Gerber, G. P., Lewbart, G., Sevilla, C., & Gentile, G. (2024). First evidence of recruitment in critically endangered Galápagos pink land iguanas (*Conolophus marthae*). *Conservation Science and Practice*, 6(4), e13108. <https://doi.org/10.1111/csp2.13108>
- [22] Gentile, G., & Snell, H. (2009). *Conolophus marthae* sp. nov. (Squamata, Iguanidae), a new species of land iguana from the Galápagos archipelago. *Zootaxa*, 2201, 1–10. <https://doi.org/10.5281/zenodo.189620>
- [23] Gentile, G. (2012). *Conolophus marthae*. *The IUCN Red List of Threatened Species, 2012*. <https://doi.org/10.2305/IUCN.UK.2012-1.RLTS.T174472A1414375.en>

El verdadero origen de la pandemia COVID-19

Gabriel Trueba^{1*} 

¹ Instituto de Microbiología, Colegio de Ciencias Biológicas y Ambientales, Universidad San Francisco de Quito, Quito-Ecuador.

*Autor de correspondencia /Corresponding author: gtrueba@usfq.edu.ec

The real origin of the COVID-19 pandemic

Resumen

En diciembre de 2019, un brote de neumonía en Wuhan constituiría el epicentro de la pandemia de COVID-19. A pesar de que se identificó un nuevo coronavirus, similar al virus de SARS que produjo una epidemia en 2002, surgieron dos hipótesis sobre su origen: el mercado de animales vivos de Wuhan y la fuga de un virus del Instituto de Virología de Wuhan (IVW). La mayoría de los científicos expertos respalda la hipótesis del origen natural del virus y su propagación a partir del mercado de animales vivos, pero ciertos grupos políticos en Estados Unidos impulsaron la teoría del escape de un virus del Instituto de Virología de Wuhan y debilitaron la confianza en las comunicaciones científicas. Una consecuencia de la desconfianza en la actividad científica fue la oposición a las medidas sanitarias como la vacunación, el uso de mascarillas, el distanciamiento social, junto con el creciente escepticismo de la actividad científica. Estas dinámicas generan consecuencias graves en salud pública y en las posibilidades de vigilancia de futuros virus.

Palabras clave: COVID-19, pandemia, origen del virus, salud pública, desinformación.

Abstract

In December 2019, an outbreak of pneumonia in Wuhan marked the epicenter of the COVID-19 pandemic. Although a novel coronavirus similar to the SARS virus responsible for an epidemic in 2002 was identified, two hypotheses emerged regarding its origin: the live animal market in Wuhan or a potential leak from the Wuhan Institute of Virology (WIV). Most scientific experts support the hypothesis of a natural origin and transmission from the live animal market. However, certain political groups in the United States promoted the lab-leak theory, which undermined trust in scientific communication. One consequence of this mistrust in science was resistance to public health measures such as vaccination, mask-wearing, and social distancing, along with growing skepticism toward scientific activity. These dynamics have serious implications for public health and for future virus surveillance efforts.

Keywords: COVID-19, pandemic, virus origin, public health, misinformation.

INTRODUCCIÓN

En diciembre de 2019, el gobierno chino intentó minimizar los reportes de un brote de neumonía en Wuhan, probablemente para no afectar las celebraciones del Año Nuevo



Licencia Creative Commons
Atribución-NoComercial 4.0



Editado por /
Edited by:
Patricio Rojas

Recibido /
Received:
26/05/2025

Aceptado /
Accepted:
18/09/2025

Publicado en línea /
Published online:
02/12/2025



Lunar, una festividad china que moviliza a cientos de millones de personas. Pese a los intentos de silenciar a los médicos chinos que alertaban sobre el creciente número de casos, las imágenes de la construcción apresurada de enormes hospitales en los alrededores de Wuhan sugerían una epidemia fuera de control [1]. Esta situación era reminiscente de la epidemia de SARS en el año 2002, cuando China ocultó la presencia de casos de SARS, otro beta-coronavirus mortal proveniente de los mercados de animales vivos en Foshan, China [2].

En enero de 2020, tras analizar el genoma viral, los científicos chinos advirtieron a sus autoridades sobre la similitud de este virus con el virus de SARS del 2002. En respuesta, el gobierno chino empezó a cerrar muy discretamente los mercados de animales vivos en Wuhan y otras ciudades [3]. En medio de este caos, un grupo de científicos chinos tuvo el acierto de tomar hisopados de superficies y jaulas de varios animales en el mercado de Huanan recientemente clausurado en Wuhan. Este mercado fue inicialmente identificado como un potencial origen de la pandemia.

Desgraciadamente, debido a la crisis sanitaria y a las pugnas políticas internas e internacionales, estas muestras fueron relegadas y permanecieron congeladas y sin analizar hasta el 2023, cuando un equipo de científicos internacionales pudo analizarlas [4]. Para finales de febrero de 2020, era claro que el virus estaba en varios continentes y el virus empezó a dejar su huella mortal en todo el mundo. A pesar de que se sospechaba que el origen del virus podía estar en el mercado de animales vivos de Huanan, Shi Zhengli, la principal experta en coronavirus de murciélagos del Instituto de Virología de Wuhan (WIV), se preguntaba si el virus podría haberse escapado de su laboratorio, una idea que fue más tarde descartada por parte de los mismos científicos del WIV [5].

El escenario de una pandemia sin tratamiento obligaba a implementar medidas de aislamiento físico entre las personas, lo que representaba una catástrofe económica y social a escala global. En Estados Unidos, algunos grupos que defienden las libertades individuales comenzaron a expresar su descontento con respecto a las medidas de aislamiento obligatorio y cierre del comercio. El presidente Donald Trump, afín a estas ideas y probablemente frustrado por el impacto económico de las restricciones, arremetió contra estas medidas y alentó la idea de que China habría creado el virus con el objetivo de perjudicar las economías occidentales. Muy pronto, algunos políticos en Estados Unidos y de otras partes del mundo amplificaron esta idea y se creó una guerra de información entre Estados Unidos y China.

En este contexto político y ante la falta de pruebas concluyentes sobre el origen del virus, surgieron diversas teorías de conspiración, que iban desde la negación de la existencia del virus hasta acusaciones de que miembros de agencias de investigación en salud de Estados Unidos habrían financiado la creación de este virus, con el objetivo de beneficiarse de alguna manera. Muchas de estas teorías de conspiración se basaban en la alegada muerte o desaparición misteriosa de científicos del WIV durante los meses que precedieron a la pandemia.

Otras teorías de conspiración afirmaban que el virus había sido diseñado por científicos mediante la modificación genética de virus naturales para producir variantes más peligrosas y letales, supuestamente a través de experimentos de ganancia de función.



Como evidencia, presentaron un artículo científico publicado en la revista científica *Plos Pathogens* en el 2017 [6], escrito por científicos de WIV y miembros de *EcoHealth Alliance*, una organización estadounidense dedicada a la investigación de potenciales pandemias provenientes de los animales silvestres.

ANÁLISIS DE LAS EXPLICACIONES TENTATIVAS

Los análisis de las muestras tomadas en el mercado de animales vivos de Huanan, en Wuhan, pocos días después del inicio de la pandemia en febrero de 2020, y examinadas posteriormente en 2023, revelaron que varias de las jaulas contenían ARN de SARS-CoV-2.

Adicionalmente, se encontró que muchas de las jaulas que dieron positivo al virus también contenían ADN de una especie de zorro conocido como “perro-mapache”, un animal frecuentemente vendido en estos mercados. Estos resultados sugieren que probablemente este animal podría haber sido una de las fuentes del virus SARS-CoV-2 [7]. Por otro lado, estudios epidemiológicos basados en la cronología de los primeros casos también apuntaron al mercado de Huanan en Wuhan, y no al IWV, como el epicentro del brote [8].

En este escenario, el virus, probablemente presente inicialmente en murciélagos, habría infectado a varios animales en granjas de cría de fauna silvestre para consumo humano en el sur de China. Algunos de estos animales, como el perro-mapache, habrían diseminado el virus cuando fueron transportados al mercado de Wuhan en 2019 [7].

La hipótesis de que un virus, ya sea natural o modificado genéticamente, escapó de un laboratorio del IWV, y de que algunos científicos de ese instituto murieron o desaparecieron, presenta dos problemas principales. Primero, según los científicos del Instituto de Virología de Wuhan, no existió el SARS-CoV-2 en ningún laboratorio antes de la pandemia [5]. Segundo, la viróloga australiana Danielle Anderson, quien trabajó en el instituto desde 2016 hasta diciembre de 2019, conoció al personal del Instituto durante ese periodo de tiempo y no presencié ninguna evidencia de enfermedad entre los miembros del Instituto hasta finales del 2019, en la que ella salió de Wuhan [9].

La idea de que los científicos chinos crearon un virus más virulento mediante la inserción de genes, como en un experimento de ganancia de función, se basa en una interpretación incorrecta de una técnica experimental publicada en 2017 [6]. Estos experimentos complejos no tienen el propósito de incrementar la virulencia de estos virus, su objetivo es utilizar el genoma del virus de SARS-CoV aislado en el 2002 como base para investigar la presencia de coronavirus capaces de infectar células humanas, utilizando muestras de animales que contienen virus silvestres [6]. Los científicos obtienen los genes que codifican la proteína de la espiga —proteína viral que permite unirse al receptor de las células humanas— a partir de cientos de virus detectados en murciélagos silvestres. Luego insertan esos genes en el genoma del SARS original, que fue aislado en 2002. Si este virus híbrido logra infectar células humanas, eso indica que en la naturaleza existen virus con el potencial de infectar a las personas.

Este proceso permite tener una idea de los virus circulantes y evita el aislamiento de miles de diferentes coronavirus, lo cual es costoso, trabajoso y poco exitoso y peligroso.



Este tipo de vigilancia permite alertar a las autoridades sanitarias en el caso de virus potencialmente capaces de producir una nueva epidemia en humanos.

Esta investigación masiva es llevada a cabo por científicos chinos, en colaboración con científicos de otros laboratorios en el mundo y obedece a una creciente preocupación por la existencia de cientos de variantes de coronavirus tipo SARS en estos murciélagos asiáticos [10]. Finalmente, si el virus SARS de 2002 hubiera sido manipulado genéticamente para crear SARS-CoV-2, hubiera sido muy fácil identificarlo por métodos moleculares, por lo que no existe evidencia de que el SARS-CoV-2 fuera un virus resultante de estos experimentos. Para muchos, la explicación científica es inválida, ya que acepta gran cantidad de evidencia presentada por los científicos chinos.

VEMOS LO QUE QUEREMOS VER

¿Qué versión sobre el origen de la pandemia es la más probable? La respuesta a la diversidad de opiniones podría no encontrarse en la microbiología, sino en la psicología. Cada persona, sea científica o no, tiende a considerar más convincentes aquellas explicaciones que se alinean con sus propias creencias y convicciones. Como resultado, algunas narrativas nos resultan más fáciles de aceptar que otras.

El sesgo de confirmación aparece cuando una idea preconcebida (acorde a nuestras convicciones) es confirmada por una explicación tentativa, lo que provoca que esta explicación sea colocada en un lugar privilegiado en nuestro cerebro. La disonancia cognitiva es lo contrario, aparece cuando una explicación está en desacuerdo con nuestras convicciones e inconscientemente es colocada en una escala de credibilidad baja dentro de nuestro cerebro.

Cuando ocurrió la pandemia, las personas estaban frustradas debido al miedo a la enfermedad, la inestabilidad económica, la falta de contacto social, etc. El cierre de los negocios, la imposición del uso de mascarillas, el distanciamiento social, y finalmente la vacunación, despertaron cuestionamientos por parte de algunos grupos (como los que promueven libertad de tratamientos médicos) en Estados Unidos. Estos grupos hostiles a los argumentos científicos eran especialmente propensos a rechazar las explicaciones basadas en evidencia científica y a aceptar toda clase de teorías de conspiración con respecto al origen del virus, además de también promover la desconfianza en las vacunas.

Otro fenómeno psicológico que se manifiesta en todas las personas ante una catástrofe es la necesidad de encontrar un culpable. Este mecanismo funciona como una forma de mitigar el sufrimiento que provoca aceptar que es imposible predecir cuándo o dónde surgirá una tragedia causada por un fenómeno natural; en este caso, la incertidumbre ante las sorpresas que puede deparar la naturaleza.

El resultado de esta crisis de información fue catastrófico. Solo en Estados Unidos se estima que al menos 241 000 muertes se debieron a la negativa a vacunarse [11] y se desconoce cuántas personas quedaron afectadas crónicamente por esta infección.



Otro efecto preocupante fue la masiva difusión de teorías de conspiración que colocaron a los científicos en el centro de la sospecha, generando una creciente desconfianza hacia la actividad científica [12]. Adicionalmente, los políticos afines a los grupos que rechazaron las explicaciones de origen natural del virus no han cesado y poco a poco la tesis de que el virus ha sido creado en laboratorio de China se escucha con mayor frecuencia. A su vez, muchos científicos se han unido a esta idea.

EVIDENCIA Y CIENCIA

Todos los fenómenos naturales han dado lugar a explicaciones discordantes entre los científicos, y esto es normal. La comunidad científica va aceptando paulatinamente ciertas hipótesis conforme van apareciendo más evidencias hasta que se alcanza una especie de consenso en la que una explicación parece más confiable [13]. Sin embargo, es común que muchos científicos permanezcan escépticos incluso frente a la explicación consensuada [13].

A pesar de que la gran mayoría de científicos especialistas en virología y epidemiología respalda la idea de que el SARS-CoV-2 fue un virus silvestre que ingresó al mercado de Wuhan por medio de animales infectados naturalmente [14], el 70 % de la población estadounidense (y posiblemente un porcentaje no muy diferente de periodistas) piensa que el virus fue originado en un laboratorio en China [15].

Los políticos seguidores de Donald Trump, y su actual gobierno, han bloqueado la investigación sobre betacoronavirus en murciélagos asiáticos [16] y otras enfermedades infecciosas zoonóticas. La percepción de muchos de estos políticos es que la investigación sobre virus fue precisamente lo que provocó la pandemia. Sin embargo, cientos, o incluso miles, de virus similares al SARS-CoV y al SARS-CoV-2 circulan entre murciélagos en el sudeste asiático [10] y, al estar en constante evolución, podrían desencadenar otra pandemia en cualquier momento.

No solamente los betacoronavirus representan una amenaza. Otros virus letales como los de influenza, ébola, Nipah, Junín, Machupo, presentes en otras regiones del mundo, parecerían esperar su turno para hacer su debut. A pesar de la impresionante tecnología con la que contamos, no es posible impedir por completo una próxima pandemia. Sin embargo, sí podemos vigilar lo que ocurre en la naturaleza para prepararnos mejor ante una posible nueva pandemia.

Observar continuamente lo que ocurre en las poblaciones de patógenos en la naturaleza es crucial para poder entender eventos que podrían causar su aumento o fenómenos asociados al cambio de su comportamiento [17].

De nada sirve autoconvencernos de que la naturaleza es benévola con los humanos o creer que, si se castiga lo suficiente a los chinos, se evitará una nueva pandemia. Como dice el dicho popular: "tapar el sol con un dedo no lo apaga".



CONTRIBUCIONES DEL AUTOR

Diseño, conceptualización y redacción del artículo: Gabriel Trueba.

DECLARACIÓN SOBRE EL USO DE TECNOLOGÍAS DE IA GENERATIVA Y ASISTIDA EN LA REDACCIÓN

Durante la preparación de este trabajo, el autor utilizó *ChatGPT* con el propósito de *mejorar algunas oraciones*. Posteriormente, el autor revisó y editó el contenido según consideró necesario, asumiendo la plena responsabilidad por la versión final del texto y su contenido publicado.

DECLARACIÓN DE DISPONIBILIDAD DE DATOS

No se utilizaron datos en este estudio.

CONFLICTO DE INTERÉS

El autor declara que no existen conflictos de interés relacionados con esta investigación.

REFERENCIAS

- [1] Hegarty, S. (6, February 2020). *The Chinese doctor who tried to warn others about coronavirus*. BBC News. <https://www.bbc.com/news/world-asia-china-51364382>
- [2] Xu, R. H., He, J. F., Evans, M. R., Peng, G. W., Field, H. E., Yu, D. W., Lee, C. K., Luo, H. M., Lin, W. S., Lin, P., Li, L. H., Liang, W. J., Lin, J. Y., & Schnur, A. (2004). Epidemiologic clues to SARS origin in China. *Emerging Infectious Diseases*, 10(6), 1030–1037. <https://doi.org/10.3201/eid1006.030852>
- [3] Standaert, M. (25, February 2020). *Coronavirus closures reveal vast scale of China's secretive wildlife farm industry*. The Guardian. <https://www.theguardian.com/environment/2020/feb/25/coronavirus-closures-reveal-vast-scale-of-chinas-secretive-wildlife-farm-industry>
- [4] Crits-Christoph, A., Levy, J. I., Pekar, J. E., Goldstein, S. A., Singh, R., Hensel, Z., Gangavarapu, K., Rogers, M. B., Moshiri, N., Garry, R. F., Holmes, E. C., Koopmans, M. P. G., Lemey, P., Peacock, T. P., Popescu, S., Rambaut, A., Robertson, D. L., Suchard, M. A., Wertheim, J. O., . . . & Débarre, F. (2024). Genetic tracing of market wildlife and viruses at the epicenter of the COVID-19 pandemic. *Cell*, 187(19), 5468–5482. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2024.09.020>
- [5] Mallapaty, S. (2024). Wuhan lab samples hold no close relatives to the virus behind COVID. *Nature*, 636(8043), 531–532. <https://doi.org/10.1038/d41586-024-03982-2>
- [6] Hu, B., Zeng, L. P., Yang, X. L., Ge, X. Y., Zhang, W., Li, B., Xie, J. Z., Shen, X. R., Zhang, Y. Z., Wang, N., Luo, D. S., Zheng, X. S., Wang, M. N., Daszak, P., Wang, L. F., Cui, J., & Shi, Z. L. (2017). Discovery of a rich gene pool of bat SARS-related coronaviruses provides new insights into the origin of SARS coronavirus. *PLoS Pathogens*, 13(11), e1006698. <https://doi.org/10.1371/journal.ppat.1006698>
- [7] Mallapaty, S. (2025). What sparked the COVID pandemic? Mounting evidence points to raccoon dogs. *Nature*, 639(8053), 14–15. <https://doi.org/10.1038/d41586-025-00426-3>
- [8] Worobey, M., Levy, J. I., Malpica Serrano, L., Crits-Christoph, A., Pekar, J. E., Goldstein, S. A., Rasmussen, A. L., Kraemer, M. U. G., Newman, C., Koopmans, M. P. G., Suchard, M. A., Wertheim, J. O., Lemey, P., Robertson, D. L., Garry, R. F., Holmes, E. C., Rambaut, A., & Andersen, K. G. (2022). The Huanan seafood wholesale market in Wuhan was the early epicenter of the COVID-19 pandemic. *Science*, 377(6609), 951–959. <https://doi.org/10.1126/science.abp8715>
- [9] Cortez, M. F. (2021, June 27). *The last—and only—foreign scientist in the Wuhan lab speaks out*. Bloomberg. <https://www.bloomberg.com/news/features/2021-06-27/did-covid-come-from-a-lab-scientist-at-wuhan-institute-speaks-out>
- [10] Menachery, V. D., Yount, B. L., Jr., Debbink, K., Agnihothram, S., Gralinski, L. E., Plante, J. A., Graham, R. L., Scobey, T., Ge, X. Y., Donaldson, E. F., Randell, S. H., Lanzavecchia, A., Marasco, W. A., Shi, Z. L., & Baric, R. S. (2015). A SARS-like cluster of circulating bat coronaviruses shows potential for human emergence. *Nature Medicine*, 21(12), 1508–1513. <https://doi.org/10.1038/nm.3985>
- [11] Vilches, T. N., Moghadas, S. M., Sah, P., Fitzpatrick, M. C., Shoukat, A., Pandey, A., & Galvani, A. P. (2022). Estimating COVID-19 infections, hospitalizations, and deaths following the US vaccination campaigns during the pandemic. *JAMA Network Open*, 5(1). <https://doi.org/10.1001/jamanetworkopen.2021.42725>
- [12] O'Grady, C. (2022, September 15). *In the line of fire: Scientists have been harassed for years. But a Science survey shows the pandemic has made things far worse for some*. Science. <https://www.science.org/content/article/overwhelmed-hate-covid-19-scientists-face-avalanche-abuse-survey-shows>
- [13] Kuhn, T. S. (1962). *The structure of scientific revolutions*. University of Chicago Press.
- [14] Enserink, M. (2024, March 20). *Virologists and epidemiologists back natural origin for COVID-19, survey suggests*. Science. <https://www.science.org/content/article/virologists-and-epidemiologists-back-natural-origin-covid-19-survey-suggests>
- [15] Poonia, G. (2024, April 17). *7 out of 10 American voters think COVID-19 came from a lab*. Deseret News. <https://www.deseret.com/politics/2024/04/17/what-are-the-origins-of-covid-19/>
- [16] Nava, V. (2025, January 18). *HHS bans EcoHealth Alliance and group's ex-prez from receiving federal funding for 5 years after Wuhan virus experiments*. New York Post. <https://nypost.com/2025/01/18/us-news/hhs-bans-ecohealth-alliance-and-groups-ex-prez-from-receiving-federal-funding-for-5-years-after-wuhan-virus-experiments/>
- [17] Temmam, S., Vongphayloth, K., Baquero, E., Munier, S., Bonomi, M., Regnault, B., Douangboubpha, B., Karami, Y., Chrétien, D., Sanamxay, D., Xayaphet, V., Paphaphanh, P., Lacoste, V., Somlor, S., Lakeomany, K., Phommavanh, N., Pérot, P., Dehan, O., Amara, F., . . . & Eloït, M. (2022). Bat coronaviruses related to SARS-CoV-2 and infectious for human cells. *Nature*, 604(7905), 330–336. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-04532-4>