UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

LA GRANJA 44

Vol. (2)

REVISTA DE CIENCIAS DE LA VIDA

NÚMERO ESPECIAL

QUIRALIDAD A DISTINTAS ESCALAS

Simetría, asimetría y vida a distintas escalas



ISSN impreso: 1390-3799 / ISSN electrónico: 1390-8596

44 Vol. (2)

LA GRANJA

La Granja Revista de Ciencias de la Vida. • Volumen 44 • Número 2 • septiembre 2026 - febrero 2027. Revista semestral de Ciencias de la Vida de la Universidad Politécnica Salesiana del Ecuador. Publicación internacional bilingüe dedicada a estudios relacionados con ciencias ambientales, de la tierra, agropecuarias, biológicas, y sus líneas transversales de conocimiento. Las ideas y opiniones expresadas en las colaboraciones son de exclusiva responsabilidad de los autores y autoras.

Consejo Editorial (Editorial Board)

Editores en Jefe (Editors-in-Chief)
Dr. Ignacio de los Ríos,
Universidad Politécnica de Madrid, España
Dra. Sheila Serrano Vincenti,
Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador

Editores Invitados del Número Especial de Quiralidad a diferentes escalas (Guest Editors of the Special Issue of Chirality across scales)

Dr. Alejandro Heredia Barbero,
Universidad Nacional Autónoma de México
Dr. Igor Bdikin,
Universidade de Aveiro, Portugal
MSc. Betsaida Lucinda Ávila Suárez,
Universidad Nacional Autónoma de México
Dra. María Noble Terán,
Universidad Autónoma del Estado de Morelos, México
Dr. Hugo Iván Cruz Rosas,
Universidad Autónoma del Estado de Morelos, México

Editores de Sección (Section Editors)

Ciencias de la Tierra (Earth sciences)
Dr. Thomas Condom,
Institut de Recherche Pour Le Développement, Francia
Dr. César Iván Álvarez,
University of Augsburg, Alemania
Dr. Charles Cachipuendo,
Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador

Ciencias Agropecuarias y Veterinarias (Agricultural and Veterinary Sciences)
Dra. Nora Mestorino,
Universidad Nacional de La Plata, Argentina.
Dra. Nancy Bonifáz,
Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.
Dra. Narcisa Relqueme,
Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Ciencias Biológicas, Biotecnológicas, Químicas y afines (Biological, Biotechnological, Chemical and related Sciences)
Dr. Paco Noriega,
Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.
Dr. Lorenzo Guerrini,
Universita di Firenze, Italia.
Dr. Alejandro Heredia Barbero,
Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), México.
Dr. Elena Coyago,
Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Ciencias Ambientales (Environmental Sciences)
Dr. Jorge G Figueroa,
Universidad Técnica Particular de Loja (UTPL), Ecuador.
Dra. María Rocío Rodríguez,
Universidad de Cádiz, España.

Fotografía Retiro (Final Photo)
Geometrías de la vida
Autor: Jonathan González Chuqui

Comité de ética y bioética (Ethics and Bioethics Committee)
Dra. Gladys Bustamante,
Universidad Mayor de San Andrés, Bolivia.
Comité Iberoamericano de Ética (CIEB)
Dr. Ángel Acevedo-Duque,
Universidad Autónoma de Chile, Chile.
Dra. Elena Coyago,
Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Coeditor Internacional en inglés
International coeditor in English
Dr. Lorenzo Guerrini,
Universita di Firenze, Italia.

Coeditor Internacional en portugués
International Coeditor in Portuguese
Dra. Rocio Elizabeth Contero Callay,
Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Consejo de Publicaciones (Publication Board)
Dr. Juan Cárdenas Tapia PRESIDENTE
Dr. José Juncosa Blasco ABYA-YALA
Dr. Esteban Inga VICERRECTOR DE INVESTIGACIÓN
Dr. Angel Torres-Toukoumidis EDITOR DE UNIVERSITAS
Dr. Jaime Padilla Verdugo EDITOR DE ALTERIDAD
Dra. Sheila Serrano Vincenti EDITORA DE LA GRANJA
Dr (c). Jorge Cueva Estrada EDITOR DE RETOS
Dr. John Calle Sigüencia EDITOR DE INGENIUS
Dra. Floralba Aguilar Gordón EDITORA DE SOPHIA
Dra. Betty Rodas Soto EDITORA DE UTOPÍA
Dra. Mónica Ruiz Vásquez EDITORA DEL NOTI-UPS
Dr. Jorge Altamirano Sánchez EDITORA REVISTA CÁTEDRA UNESCO
MSc. David Armendáriz González EDITOR WEB
Dr. Angel Torres-Toukoumidis EDITOR GENERAL

Consejo Técnico (Technical Board)
Lcda. María José Cabrera (Técnica Marcalyc)
Lcdo. Christian Arpi (Coordinador Community Managers)
MSc. Mariana Luna (Asistente editorial)
Dr. Danny Vargas (Editor Asistente)

Servicio de Publicaciones (Publications Service)
Hernán Hermosa (Coordinación General)
Marco Gutiérrez (Soporte OJS)
Mariana Luna (Maquetación)
Adriana Curiel (Traductora)

Editorial
Editorial Abya Yala (Quito-Ecuador)
Avenida 12 de octubre N-422 y Wilson
Bloque A, UPS Quito, Ecuador
Casilla 17-12-719
Teléfonos: (593-2) 3962800 ext. 2638
Correo electrónico: editorial@abyayala.org

Fotografía de portada y contraportada (Cover and Back Cover Photo)
"La quiralidad como un juego de simetría y asimetría presente a distintas escalas de la naturaleza. Las composiciones especulares integran formas biológicas, cristalinas y moleculares para representar cómo la lateralidad emerge desde la materia inerte hasta la vida."
Autores: Editores invitados

Copyright: La Granja: Revista de Ciencias de la Vida, Universidad Politécnica Salesiana. Se permite la reproducción total o parcial de esta revista citando la fuente.

La Granja: Revista de Ciencias de la Vida

Volumen 44, Número 2, septiembre 2026 – febrero 2027

ISSN impreso 1390-3799 • ISSN electrónico 1390-8596

La administración de La Granja se realiza a través de los siguientes parámetros:

• La revista utiliza el sistema antiplagio académico iThenticate Professional Plagiarism Prevention

• Los artículos cuentan con código de identificación (*Digital Object Identifier*) doi

• El proceso editorial se gestiona a través del *Open Journal System* OJS Open Journal Systems

Es una publicación de acceso abierto (*Open Access*) con licencia *Creative Commons*

CC BY NC SA

Las políticas *copyright* y de uso *postprint*, se encuentran publicadas en el Repositorio de Políticas de Autoarchivo *Sherpa/Romeo*.

Los artículos de la presente edición pueden consultarse en `https://lagranja.ups.edu.ec/`

ABYA YALA | UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Universidad Politécnica Salesiana del Ecuador

LA GRANJA, está indexada en las siguientes Bases de Datos y sistemas de información científica:

BASES DE DATOS INTERNACIONALES SELECTIVAS

PLATAFORMAS DE EVALUACIÓN DE REVISTAS

DIRECTORIOS SELECTIVOS

HEMEROTECAS SELECTIVAS

BUSCADORES DE LITERATURA CIENTÍFICA OPEN ACCESS

POLÍTICAS DE COPYRIGHT DE LAS EDITORIALES Y AUTOARCHIVO

Otras Bases de Datos Bibliográficas

Dialnet

Catálogo de Bibliotecas Internacionales Universitarias

American University of Sharjah 1997

UNIVERSITEIT VAN PRETORIA
UNIVERSITY OF PRETORIA
YUNIBESITHI YA PRETORIA

Maastricht University

ERASMUS UNIVERSITEIT ROTTERDAM

Hanzehogeschool Groningen

UNIVERSITY OF SKÖVDE

BISHOP GROSSETESTE UNIVERSITY

DEPAUL UNIVERSITY
COLLEGE OF LAW

BETHUNE-COOKMAN UNIVERSITY 1904 1923 1972 2007

Université Sainte Anne

Plymouth State University

DEPAUL UNIVERSITY

FRANKLIN COLLEGE

University of Nebraska Omaha

Southwestern University

TEXAS A&M UNIVERSITY SAN ANTONIO

SIMPSON UNIVERSITY

AUT UNIVERSITY

CLAREMONT McKENNA COLLEGE

ExLibris Primo

UNIVERSITY OF THE WEST

Universidad de Navarra

MUHLENBERG COLLEGE

FRANKLIN & MARSHALL COLLEGE

TYNDALE UNIVERSITY COLLEGE & SEMINARY

THE UNIVERSITY of NORTH CAROLINA GREENSBORO

UNC CHARLOTTE

Consejo Científico (Advisory Board)

Dr. Guillermo Marcillo, University of Illinois Urbana Champaign, EEUU
Dr. Alessandro Medici, Universita di Ferrara, Italia
Dr. John Mejía, Universidad de Nevada, Estados Unidos
Dra. Enrica Caporali, Universita di Firenze, Italia
Dr. Ankit Singla, Ministry Office of Agriculture, Co-operation and Farmers Welfare, India Government
Dra. Paola VitaFinzi, Universita di Pavia, Italia
Dr. Geovanni Vidari,Universita di Pavia, Italia
Dr. Flavio Contreras-Torres, Universidad Autónoma de México, México
Dr. Miguel A. Altieri, University of California, EEUU
Dra. Clara Inés Nicholls, University of California, EEUU
Dr. Jaime Vadell Adrover, Universidad de las Islas Baleares, España
Dra. Janeth Patricia Muñoz Eraso, Pontificia Universidad Javeriana, Colombia.
Dr. Marcos Villacís, Escuela Politécnica Nacional, Ecuador
Dra. Silvia Perez Damonte, Universidad de Buenos Aires, Argentina
Dr. Fernando Funes Monzote, Universidad de Matanzas, Cuba
Dra. Alessandra Guerrini, Universita di Ferrara, Italia
Dr. Giovanni Bernacchia,Universita di Ferrara, Italia
Proff. León Escobar Moreira, SYNAPTRONIC, EEUU
Dr. Lorenzo Guerrini, Universita di Firenze, Italia
Dr. José Luis Santos. International CLIVAR Project Office, China
Dr. Solveig Tosi,Universita di Pavia, Italia
Dra. Priscila dos Santos Silva, Universidad de Sao Paulo, Brasil
Dra. Connie Gallardo Vela, Universidad de Sao Paulo, Brasil
Dr. Thomas Condom, Institut de Recherche Pour Le Développement, Francia
Dr. Leonardo Basile, Escuela Politécnica Nacional, Ecuador
Dra. Claudinéia Brazil, Faculdade Dom Bosco de Porto Alegre, Brasil
Dr. Alejandro Fontana, Universidad de Piura, Perú
Dra. Adriana Sánchez Urdaneta, Universidad de Zulia, Venezuela
Dr. Emmanuel Donkor, Kwame Nkrumah University of Science and Technology, West Africa
Dr. Jorge Palomeque Santiago, Instituto Mexicano del Petróleo, México
Dr. Alejandro Heredia Barbero, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ciencias
Dr. Carlos Hernandez Medina, Centro Universitario Municipal Camajuaní, Cuba
Dr. Daniel A. Lowy, Northern Virginia Community College, EEUU
Dr. László Palcsu, Institute of Nuclear Research of the Hungarian Academy of Sciences,Hungría
Dr. Marjan Temovski, Institute of Nuclear Research of the Hungarian Academy of Sciences, Hungría
Dr. Elemer Laszlo, Institute of Nuclear Research of the Hungarian Academy of Sciences,Hungría
Dr. Pablo Marini, Universidad Nacional de Rosario, Argentina
Dr. Antonio Panico Università degli Studi Pegaso, Italia
Dr. Fernando Bimbela, Univerdidad Publica de Navarra, España
Dr. Panagiotis Kechagiopoulos, University of Aberdeen, Reino Unido.
Dr. Carlo Visconti, Politecnico di Milano, Italia
Dra. Marta Elena Alonso, Universidad de León, España
Dra. Alison Hanlon, University College Dublin, Irlanda
Dr. Mehmood Ali, NED University of Engineering and Technology, Pakistán
Dra. Ana Teodoro, Universidade do Porto, Portugal

Consejo Internacional de Revisores (International Reviewers Board)

Dr. Guillermo Marcillo, University of Illinois Urbana Champaign, EE.UU.
Dr. Antonio Panico Università degli Studi Pegaso, Italia
Dr. John Mejía, Universidad de Nevada, EE.UU.
Dra. Enrica Caporali, Universita di Firenze, Italia
Dra. Nancy Bonifáz, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador
Dra. Paola VitaFinzi, Universita di Pavia, Italia
Dr. Flavio Contreras-Torres, Universidad Autónoma de México, México
Dr. Alejandro Heredia Barbero, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), México
Proff. León Escobar Moreira, SYNAPTRONIC, EE.UU.
Dr.Geovanni Vidari,Universita di Pavia, Italia
Dra. Lorena Meneses, Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Ecuador
Dr. Fernando Funes Monzote, Universidad de Matanzas, Cuba
Dr. Nicolás Vásquez, Escuela Politécnica Nacional, Ecuador
Dr. Giovanni Bernacchia,Universita di Ferrara, Italia
Dr. Juan H. Avellaneda Cevallos, Universidad Técnica Estatal de Quevedo Ecuador
Dr. Lorenzo Guerrini, Universita di Firenze, Italia
Dr. José Luis Santos, International CLIVAR Project Office, China
Dr. Solveig Tosi, Universita di Pavia, Italia
Dra. Pamela Jaramillo, Mikuna-Food Science and Technology, Ecuador
Dr. Juan Enrique Tacoronte, Universidad Central del Ecuador, Ecuador
Dra. Mercy Bordor, Escuela Politécnica del Litoral
Dr. Christian Domínguez, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador
MSc. Laura Huachi, Universidad Politécnica Salesiana
Dra. Priscila dos Santos Silva, Universidad de Sao Paulo, Brasil
Dr. Pablo Marini, Universidad Nacional de Rosario, Argentina
Dra. Claudineia Brazil, Universidad de Don Bosco de Puerto Alegre, Brasil
Dra. Adriana Sánchez Urdaneta, Universidad de Zulia, Venezuela
MSc. Bernardo Navarrete, Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias-INIAP, Ecuador
Dr. Jorge Palomeque Santiago, Instituto Mexicano del Petróleo, México
Dr. Antonio Panico Università degli Studi Pegaso, Italia
MSc. Patricio Yánez Moretta, Universidad Internacional del Ecuador, Ecuador
Dr. Emmanuel Donkor, Kwame Nkrumah University of Science and Technology, West Africa
Dr. Carlos Hernandez Medina, Centro Universitario Municipal Camajuaní, Cuba
Dr. Daniel A. Lowy, Northern Virginia Community College, EE.UU.
Dr. Marjan Temovski, Institute of Nuclear Research of the Hungarian Academy of Sciences, Hungría
Dr. Elemer Laszlo, Institute of Nuclear Research of the Hungarian Academy of Sciences,Hungría
Dr. Manuel Maldonado, Escuela Politécnica del Ejército, Ecuador.
Dr. Mehmood Ali, NED University of Engineering and Technology, Pakistán
Dr. Oscar Peña Cáceres, Universidad Nacional de Piura, Perú
Dra. Ana Teodoro, Universidade do Porto, Portugal
Dr. Panagiotis Kechagiopoulos, University of Aberdeen, Reino Unido
Dr. Carlo Visconti, Politecnico di Milano, Italia
Dr. Fernando Bimbela, Universidad Pública de Navarra, España
Dra. Marta Elena Alonso, Universidad de León, España
Dra. Alison Hanlon, University College Dublin, Irlanda
Dr. Sabino Armenise, Universidad Rey Juan Carlos, España
Dr. Jesús Evaristo Tumi Quispe, Universidad Nacional del Altiplano, Perú

Revisores Volumen 44 Número 2 (Reviewers Volume 44 Number 2)

Revisores Richard Alcides Molina Alvarez, Universidade Federal de Roraima, Brasil.
Gabriela Méndez, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.
Jaime Naranjo-Morán, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.
Paco Fernando Noriega-Rivera, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.
Ulbio Alcívar-Cedeño, Universidad Técnica de Manabí, Ecuador.
Johana Meneses Morillo, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.
Jorge Toro, Universidad de Investigación de Tecnología Experimental Yachay, Ecuador.
Paul Esteban Bravo López, Universidad del Azuay,
Instituto de Estudios de Régimen Seccional del Ecuador (IERSE), Ecuador.
Fredy Cuarán, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.
Roxanna Palma, Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Ecuador.
Ximena Borja, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.
René Parra, Universidad San Francisco de Quito, Ecuador.
Cristian Zambrano, Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP), Ecuador.
Rosita Graciela Espinoza Gavilanes, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.
Mario Guadalupe González Pérez, Universidad de Guadalajara, México.
William Sacher, Universidad Andina Simón Bolívar, Ecuador.
Daniel Acosta-Avalos, Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF), Brasil.
Yolanda Marina Vargas Rodríguez, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
María Soledad Córdova Aguilar, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
Héctor Vázquez López, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
Hugo I. Cruz Rosas, Universidad Autónoma del Estado de Morelos, México.
María Eugenia Noble Terán, Universidad Autónoma del Estado de Morelos, México.

El Comité Editorial expresa su profundo agradecimiento a los revisores por pares que contribuyeron con su tiempo y experiencia para garantizar la calidad científica de los artículos publicados en este número.

Índice

Editorial 8

Número especial: Quiralidad a diferentes escalas

Ruptura de la simetría quiral en cristales de $NaClO_3$ como modelo para el estudio de la homoquiralidad biológica 13
Hugo I. Cruz-Rosas, María E. Noble-Terán, José-Manuel Cruz, Heidi García Quintana, Marleen Alejandra Chávez Vidal, Fátima del C. Ramírez Hernández y Thomas Buhse†.

Una mirada a los *D*-aminoácidos en los seres vivos 27
Josué Fabián Díaz Aguilar y Mario Israel Hernández Alva.

Tendencia a la asimetría funcional y quiralidad helicoidal inducida por microsatélites en *Staphylococcus aureus* 42
Ernesto Ríos-Willars, María Magdalena Delabra-Salinas y Mónica Itzel García Martínez

Ciencias de la Tierra

Variabilidad hidrológica por cambio de cobertura de suelo en la cuenca del río Wawayme debido a actividades mineras, Ecuador 60
Raúl Andrés Moreno Farfán y María Z. Flores López.

Biotecnología

Extracto liofilizado de *Ilex guayusa*: potencial ingrediente para bebidas energizantes 80
Laura Scalvenzi, Sting Luna Fox y Matteo Radice.

Potencial antimicrobiano del extracto fluido de *Vaccinium floribundum* frente a *Staphylococcus saprophyticus* causante de infecciones de vías urinarias 99
Johana Meneses, Stephanie Moncayo, María E. Maldonado y Ramiro Acurio.

Ciencias Agrícolas

Aplicación de un Modelo de superficie de respuesta en el secado al sol y solar indirecto de uvas variedad moscatel de alejandria (*Vitis vinífera*) 116
David Vivanco Pezantes, Haydee Rodriguez Navarro, Raúl Siche Jara y David Callirgos Romero.

Manejo integrado de Zabrotes subfasciatus en el frijol común (*Phaseolus vulgaris*), desafíos y estrategias de control para la seguridad alimentaria 139
Luis David Jarquín-Izaguirre, Luisa Fernanda Correa Díaz y Saul Alejandro Jarquín-Izaguirre.

Conservación y Ciencias Ambientales

Factores de cobertura y uso del suelo asociados al riesgo de degradación de la vegetación en la Reserva Ecológica Arenillas 154
Jaime Enrique Maza Maza, Hugo Enrique Añazco Loaiza, Darwin Amable Poma Luna y Alex Dumany Luna Florin.

Evaluación de la composición de aerosoles sedimentables en el área urbana del cantón Espíndola, provincia de Loja, Ecuador 171
David Emmanuel del Pozo, María de los Angeles Alvarez y Bryan Gabriel Valle.

Normas para autores 185

Editorial

ABYA YALA | UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Estimadas y estimados lectores,

Desde los experimentos pioneros de Louis Pasteur, realizados en colaboración con Marie Laurent en el siglo XIX, la quiralidad ha cautivado el pensamiento científico, artístico y filosófico. Al observar cristales derivados del ácido tartárico, Laurent y Pasteur distinguieron formas especulares y abrieron una ventana hacia uno de los problemas más profundos de la ciencia: la preferencia de una simetría sobre otra en la materia. En los sistemas vivos, esta asimetría se manifiesta de manera clara, pues determinadas formas moleculares predominan sobre sus imágenes especulares y adquieren funciones específicas. La quiralidad puede reconocerse a múltiples escalas, desde las partículas subatómicas hasta los sistemas biológicos y las estructuras cosmológicas. Este volumen especial de *La Revista de Ciencias de la Vida, La Granja*, en colaboración con el *Instituto de Ciencias Nucleares de la Universidad Nacional Autónoma de México*, el *Centro de Investigaciones Químicas de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos, México, la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Autónoma de México* y la *Red de Investigaciones Interdisciplinarias en Quiralidad (RiiQ)*, explora algunas de sus múltiples facetas y su papel en la organización de la materia y de los sistemas vivos.

El estudio de la ruptura de la simetría quiral en sistemas cristalinos ha proporcionado un modelo teórico y experimental robusto para comprender cómo pudo surgir la asimetría antes del origen de la vida. La cristalización del $NaClO_3$, un compuesto aquiral en solución que forma conglomerados enantiomorfos, demuestra que la quiralidad puede emerger a nivel supramolecular a partir de sistemas simples. Este fenómeno se aborda en el manuscrito de Cruz-Rosas, H. et al., «*Ruptura de la simetría quiral en cristales de $NaClO_3$, como modelo para el estudio de la homoquiralidad biológica*», donde se analizan condiciones experimentales que permiten a un sistema inicialmente sin preferencia quiral transitar hacia estados de elevada pureza enantiomérica.

Procesos como la nucleación secundaria y la desracemización de Viedma muestran que fluctuaciones locales, acopladas a ciclos de disolución y cristalización inducidos mediante energía mecánica o térmica, pueden amplificar una asimetría sin requerir necesariamente un sesgo externo inicial. Estos procesos fuera del equilibrio ofrecen escenarios plausibles para comprender cómo una química prebiótica inicialmente racémica pudo evolucionar hacia preferencias quirales. Sin embargo, la transición entre esta asimetría fisicoquímica y su fijación en sistemas autorreplicantes continúa siendo un problema abierto. ¿Fueron los procesos cristalinos determinantes para sesgar la evolución química o actuaron conjuntamente con otros mecanismos físicos?

La homoquiralidad biológica, particularmente el predominio de L-aminoácidos en la síntesis de proteínas, ha sido considerada tradicionalmente una propiedad característica de la vida. Sin embar-

La Granja:*Revista de Ciencias de la Vida* 44(2) 2026: 8-12
©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

go, como exponen Díaz Aguilar, J. et al. en «*Una mirada a los* D*-aminoácidos en los seres vivos*», esta visión se ha enriquecido con el descubrimiento de funciones esenciales desempeñadas por enantiómeros D en distintos organismos.

D-aminoácidos como la D-alanina y el D-glutamato son componentes fundamentales del peptidoglicano bacteriano, mientras que la D-serina y el D-aspartato desempeñan funciones relevantes en mamíferos. Esta coexistencia plantea una cuestión central: ¿cómo preservan los organismos la fidelidad quiral de su proteoma mientras utilizan selectivamente el enantiómero opuesto? Mecanismos enzimáticos como las D-aminoacil-*tRNA* desaciclasas contribuyen a este control. Más que una homoquiralidad absoluta en todos sus niveles, la vida revela así un escenario donde homoquiralidad y heteroquiralidad pueden coexistir funcionalmente.

En un nivel mayor de complejidad, la quiralidad también se manifiesta en la organización de la información genética. El trabajo de Rios-Willars et al., «*Tendencia a la asimetría funcional y quiralidad helicoidal inducida por microsatélites en Staphylococcus aureus*», explora esta dimensión mediante el análisis de secuencias repetitivas o microsatélites. Las diferencias observadas en la distribución de motivos como ATAT, AGAG y ACAC sugieren una reorganización de la arquitectura repetitiva con posibles implicaciones estructurales y evolutivas. Esta asimetría incorpora una dimensión espacial y conformacional en la organización del genoma que trasciende su descripción como una simple secuencia lineal.

Actualmente disponemos de más herramientas para comprender la ruptura de la simetría quiral y su amplificación, pero aún no hemos desentrañado por qué la asimetría aparece de manera tan persistente en la naturaleza. ¿Es la preferencia quiral de los sistemas biológicos consecuencia de fluctuaciones iniciales amplificadas mediante procesos no lineales y autocatalíticos, o refleja asimetrías más fundamentales de las leyes físicas, como la violación de la paridad en la interacción débil? Es posible que la respuesta se encuentre en la confluencia de distintos niveles de explicación.

Esta búsqueda resuena con el trabajo de Germinal Cocho Gil† y Thomas Buhse†, dos referentes en el estudio de la complejidad y la quiralidad, a quienes desde estas páginas extrañamos y recordamos con admiración. Sus contribuciones ampliaron nuestra comprensión de la irreversibilidad, la ruptura de la simetría y la emergencia del orden en sistemas químicos y biológicos.

En este contexto, la Red Interdisciplinaria de Investigaciones en Quiralidad, de México, constituye un espacio para el diálogo y la colaboración entre quienes estudian estos fenómenos desde distintas disciplinas. Su reunión anual, que este año se llevará a cabo en el Instituto de Ciencias Nucleares de la UNAM el 12 de noviembre de 2026, representa una oportunidad para compartir ideas y trazar nuevas rutas de investigación. Este volumen especial de *La Granja* se suma a ese esfuerzo, ofreciendo una plataforma para difundir conocimiento y estimular el debate.

Como seres vivos, encarnamos la ruptura de la simetría en nuestras células, aminoácidos, proteínas y en la estructura helicoidal del ADN. La asimetría molecular no es únicamente una curiosidad geométrica: está íntimamente ligada a la organización y funcionalidad de la vida. Sin embargo, la vida es también un proceso dinámico y frágil. Cuando termina, comienza el lento proceso de racemización; la orientación molecular asociada con la función se desvanece y el sistema avanza nuevamente hacia el equilibrio termodinámico. Los aminoácidos que alguna vez formaron parte de proteínas activas

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

tienden progresivamente hacia estados racémicos, como un eco de aquella química prebiótica de la Tierra primitiva de la que emergieron.

La quiralidad a distintas escalas nos enfrenta con preguntas que atraviesan la física, la química y la biología, y nos invita a reflexionar sobre la relación entre las partículas elementales, la vida y el cosmos; entre el orden y el equilibrio; entre la asimetría funcional y la simetría termodinámica. Este volumen especial de *La Granja* no pretende ofrecer respuestas definitivas, sino delimitar algunas de las fronteras que nuestra comunidad académica continúa explorando. En este sentido, constituye una invitación a profundizar críticamente en una de las preguntas más persistentes de la ciencia: cómo pudo emerger, a partir de la materia y sus interacciones, la organización que dio origen a la vida.

Tras los tres manuscritos del especial sobre quiralidad, la edición se abre a siete artículos misceláneos de las ciencias de la vida. Aunque diversos, comparten una misma vocación: convertir la observación rigurosa en conocimiento capaz de explicar la complejidad de lo vivo y orientar su cuidado. Cuencas, reservas, especies nativas y alimentos trazan así una continuidad entre investigación fundamental, conservación e innovación.

Dos estudios advierten sobre la necesidad de observar de manera continua los cambios ambientales: Primero, Raúl Moreno y María Flores analizan la cuenca del río Wawayme, de Ecuador, donde la reducción de la cobertura vegetal vinculada con actividades mineras modifica la respuesta hidrológica y evidencia que los cambios de uso del suelo repercuten directamente en la disponibilidad y dinámica del agua. El estudio subraya la importancia de combinar monitoreo, mitigación y conservación con acciones que fortalezcan la resiliencia de las comunidades locales.

Mientras que, Jaime Enrique Maza, Hugo Anazco, Darwin Poma y Alex Luna estudian la Reserva Ecológica Arenillas. El análisis identifica sectores de alto riesgo cerca de vías y actividades productivas, y confirma que la protección del interior de una reserva es insuficiente si no se gestionan sus bordes. Conservar exige proteger áreas adyacentes, reducir presiones antrópicas y mantener la conectividad con otros remanentes naturales.

La biodiversidad regional, por su parte, se presenta como fuente de conocimiento y valor agregado; Laura Scalvenzi, Sting Luna Fox y Matteo Radice optimizan un extracto liofilizado de *Ilex guayusa* rico en cafeína. La extracción acuosa asistida por ultrasonido y la caracterización del producto aportan una base tecnológica para desarrollar ingredientes destinados a bebidas energizantes. El trabajo muestra cómo un recurso amazónico puede generar valor agregado cuando la innovación se sustenta en procesos rigurosos y responsables.

Asimismo, Johana Meneses, Stephanie Moncayo, María Elena Maldonado y Ramiro Acurio evalúan extractos de *Vaccinium floribundum* frente a *Staphylococcus saprophyticus*. La marcada actividad antimicrobiana observada *in vitro* relaciona la riqueza fenólica y antociánica del mortiño con una respuesta prometedora. El estudio amplía el horizonte científico de una especie andina de relevancia cultural y productiva.

Los sistemas alimentarios completan este recorrido; David Vivanco, Haydee Rodríguez, Raúl Siche y David Callirgos optimizan el secado de uvas Moscatel de Alejandría. El secado solar indirecto reduce el tiempo de procesamiento y conserva una alta aceptabilidad, demostrando que el uso de modelos matemáticos puede mejorar la eficiencia sin descuidar la calidad. Esta aproximación ofrece al-

La Granja:*Revista de Ciencias de la Vida* 44(2) 2026: 8-12
©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

ternativas pertinentes para cadenas agroalimentarias que buscan aprovechar mejor la energía solar.

Asimismo, Luis David Jarquín-Izaguirre, Luisa Fernanda Correa Díaz y Saúl Alejandro Jarquín-Izaguirre revisan el manejo de *Zabrotes subfasciatus* en frijol común. La articulación de métodos culturales, físicos, químicos y fitogenéticos aparece como la estrategia más sólida para proteger los granos almacenados y reducir la dependencia de insecticidas. El monitoreo, las variedades resistentes y la capacitación de productores resultan esenciales para la seguridad alimentaria.

La calidad ambiental también se expresa en aquello que no siempre resulta visible. El estudio realizado en Espíndola por David del Pozo, María de los Ángeles Álvarez y Bryan Valle, encontró concentraciones de material particulado sedimentable inferiores al límite normativo, pero confirmó la presencia de metales pesados. El cumplimiento de una norma, por tanto, no debe interpretarse como ausencia de riesgo. Fortalecer la vigilancia de la calidad del aire en comunidades rurales permitirá reconocer tempranamente los efectos de las emisiones vehiculares y de las actividades extractivas, ámbitos donde la información continúa siendo limitada.

En conjunto, este número articula dos perspectivas complementarias de las ciencias de la vida. El especial sobre quiralidad indaga en las asimetrías fundamentales que participan en la organización de la materia y de los sistemas biológicos; la sección miscelánea traslada esa misma voluntad de comprender hacia desafíos concretos de los territorios, la biodiversidad, la producción de alimentos y la calidad ambiental. Desde la arquitectura molecular hasta la dinámica de una cuenca o la conservación de un bosque, los trabajos reunidos confirman que la vida sólo puede entenderse mediante el diálogo entre escalas, disciplinas y contextos. Con esta edición, *La Granja* renueva su compromiso con una ciencia plural, rigurosa y situada, capaz de formular preguntas fundamentales y, al mismo tiempo, aportar herramientas para construir futuros más saludables, sostenibles y resilientes.

Cordialmente,

PhD. Ignacio de los Ríos
Universidad Politécnica de Madrid, España
EDITOR EN JEFE

PhD. Sheila Serrano Vincenti
Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador
EDITORA EN JEFE

PhD. Alejandro Heredia Barbero
Universidad Nacional Autónoma de México
EDITOR INVITADO

PhD. Igor Bdikin
Universidade de Aveiro, Portugal
EDITOR INVITADO

MSc. Betsaida Lucinda Ávila Suárez
Universidad Nacional Autónoma de México
EDITORA INVITADA

PhD. María Noble Terán
Universidad Autónoma del Estado de Morelos, México
EDITORA INVITADA

PhD. Hugo Iván Cruz Rosas
Universidad Autónoma del Estado de Morelos
EDITOR INVITADO

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

©2022, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

La Granja: Revista de Ciencias de la Vida
pISSN:1390-3799; eISSN:1390-8596
https://doi.org/10.17163/lgr.n44.2026.01

Edición Especial / Special Issue
Quiralidad a diferentes escalas

Ruptura de la simetría quiral en cristales de $NaClO_3$ como modelo para el estudio de la homoquiralidad biológica

Chiral symmetry breaking in $NaClO_3$ crystals as a model for the study of biological homochirality

Hugo I. Cruz-Rosas*[1,4], María E. Noble-Terán[2,4], José-Manuel Cruz[3,4], Heidi García Quintana[2], Marleen Alejandra Chávez Vidal[2], Fátima del C. Ramírez Hernández[2] y Thomas Buhse[2,4,†]

[1]*Facultad de Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México. [*https://ror.org/01tmp8f25*]*
[2]*Centro de Investigaciones Químicas – IICBA, Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Cuernavaca, Morelos, México. [*https://ror.org/03rzb4f20*]*
[3]*Facultad de Ciencias en Física y Matemáticas, Universidad Autónoma de Chiapas, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México. [*https://ror.org/04eexme77*]*
[4]*Red Interdisciplinaria de Investigaciones en Quiralidad (RiiQ), México.*

*Autor para correspondencia: quetzal@ciencias.unam.mx

Manuscrito recibido el 26 de marzo de 2026. Aceptado, tras revisión el 06 de julio de 2026. Publicado el 1 de septiembre de 2026.

Resumen

Los seres vivos están constituidos por moléculas quirales. En ausencia de influencias asimétricas, las reacciones químicas que producen moléculas quirales generan proporciones estadísticamente equivalentes de los enantiómeros izquierdo y derecho (estado racémico). Sin embargo, los sistemas biológicos muestran una marcada preferencia por uno de los enantiómeros. El caso paradigmático es el uso predominante de aminoácidos levógiros (L) en la síntesis de proteínas y de azúcares pentosas dextrógiras (D) en la síntesis de ácidos nucleicos (DNA y RNA). Los mecanismos de cristalización asimétrica del clorato de sodio ($NaClO_3$) constituyen un modelo experimental para estudiar el posible origen de esta asimetría molecular y su relevancia para los sistemas biológicos. En el presente artículo revisamos los mecanismos responsables de la formación de cristales quirales de $NaClO_3$, incluyendo los procesos de amplificación y desracemización, así como sus posibles aplicaciones en la obtención de compuestos enantioméricamente puros. Asimismo, analizamos la relación entre la asimetría observada en estos sistemas inorgánicos y la homoquiralidad biológica. Finalmente, discutimos la hipótesis de que procesos de cristalización asimétrica pudieron ocurrir en la Tierra prebiótica e influir en la dinámica molecular asociada con el origen de la vida. Concluimos que los sistemas basados en $NaClO_3$ constituyen un modelo útil para comprender los mecanismos físicos capaces de generar y amplificar asimetrías quirales a partir de condiciones inicialmente simétricas.

Palabras clave: Homoquiralidad, cristalización asimétrica, desracemización, clorato de sodio ($NaClO_3$), origen de la vida.

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Abstract

Living systems are composed of chiral molecules. In the absence of asymmetric influences, chemical reactions that generate chiral molecules produce statistically equivalent proportions of left- and right-handed enantiomers (the racemic state). However, biological systems exhibit a marked preference for one enantiomer over the other. The paradigmatic example is the predominant use of L-amino acids in protein synthesis and D-pentose sugars in the synthesis of nucleic acids (DNA and RNA). The asymmetric crystallization mechanisms of sodium chlorate ($NaClO_3$) provide an experimental model for investigating the possible origin of this molecular asymmetry and its relevance to living systems. In this article, we review the mechanisms responsible for the formation of chiral $NaClO_3$ crystals, including amplification and deracemization processes, as well as their potential applications in the production of enantiomerically pure compounds. We also examine the relationship between the chiral asymmetry observed in these inorganic systems and biological homochirality. Finally, we discuss the hypothesis that asymmetric crystallization processes may have occurred on the prebiotic Earth and influenced the molecular dynamics associated with the origin of life. We conclude that $NaClO_3$-based systems provide a useful model for understanding the physical mechanisms capable of generating and amplifying chiral asymmetries from initially symmetric conditions.

Keywords: Homochirality, asymmetric crystallization, deracemization, sodium chlorate ($NaClO_3$), origin of life.

Forma sugerida de citar: Cruz-Rosas, H. I., et al. (2026). Ruptura de la simetría quiral en cristales de $NaClO_3$ como modelo para el estudio de la homoquiralidad biológica. *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida.* Vol. 44(2):13-26. https://doi.org/10.17163/lgr.n44.2026.01.

Orcid IDs:

Hugo I. Cruz-Rosas: https://orcid.org/0000-0003-2451-544X
María E. Noble-Terán: https://orcid.org/0000-0002-6435-5551
José-Manuel Cruz: https://orcid.org/0000-0003-3306-5137
Heidi García Quintana: https://orcid.org/0009-0009-1879-0649
Marleen Alejandra Chávez Vidal: https://orcid.org/0009-0006-9550-8561
Fátima del C. Ramírez Hernández: https://orcid.org/0009-0009-2852-1709
Thomas Buhse: https://orcid.org/0000-0001-5082-0873

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

1 Introducción

La quiralidad es una propiedad geométrica que permite a ciertos objetos o sistemas existir en dos formas que son imágenes especulares no superponibles, análogas a las manos izquierda y derecha (ver Figura 1).

En el caso de moléculas y cristales quirales, estas formas se denominan enantiómeros. Los enantiómeros pueden distinguirse por su interacción con la luz linealmente polarizada, ya que son capaces de rotar el plano de polarización en sentidos opuestos. Esta propiedad se denota como $(+)$ o $(-)$, dependiendo de si la rotación es en sentido horario o antihorario, respectivamente. Esta propiedad dio origen a los términos levógiro (L) y dextrógiro (D); sin embargo, en la química moderna las designaciones L y D no describen la rotación óptica, sino que corresponden a una nomenclatura estructural relativa basada en la proyección de Fischer del gliceraldehído.



Figura 1. Quiralidad en la anatomía de los gasterópodos. El giro dextral (hacia la derecha) en la concha de la mayoría de especies de caracoles define una asimetría quiral, pues los individuos cuyas conchas presentan giros sinistrales (hacia la izquierda) son menos frecuentes. Esta inversión en el giro de la concha es originada por mutaciones que alteran la anatomía del animal desde las primeras segmentaciones del desarrollo embrionario.

Por otra parte, la configuración absoluta de una molécula quiral se define mediante el sistema R/S (*rectus*/*sinister*), el cual se asigna de acuerdo con las reglas de prioridad de Cahn–Ingold–Prelog (Cleaves, 2023). Estas reglas establecen un orden de los sustituyentes alrededor de un centro quiral en función del número atómico (Z) de los átomos directamente unidos, y, en caso de empate, mediante la comparación progresiva de los átomos siguientes en la cadena. A partir de este ordenamiento se determina la disposición espacial de los grupos alrededor del centro quiral.

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

En la Figura 2 puede verse un ejemplo de la asignación de la configuración absoluta R/S según estas reglas para el ácido láctico. En ambos enantiómeros, el sustituyente de menor prioridad es $-H$ ($Z = 1$), por lo que se orienta hacia atrás de la molécula. La siguiente prioridad la tiene el $-CH_3$, seguido del $-CO_2H$, pues el número atómico del C es $Z = 6$, el cual está presente en ambos sustituyentes unidos directamente al centro quiral (carbono alfa). Ante este empate se comparan los siguientes átomos: el hidrógeno tiene un $Z = 1$ y el oxígeno un $Z = 8$, por lo que $-CH_3$ (C unido a H, H, H) tiene menor prioridad que $-CO_2H$ (C unido a O, O, H). Finalmente, el $-OH$ es el sustituyente de mayor prioridad, pues $Z = 8$ para el oxígeno unido al centro quiral. De este modo, las prioridades quedan: $OH > CO_2H > CH_3 > H$. Por lo tanto, el recorrido $OH \rightarrow CO_2H \rightarrow CH_3$ en sentido antihorario corresponde a la configuración *S*, mientras que en sentido horario corresponde a la configuración *R*.

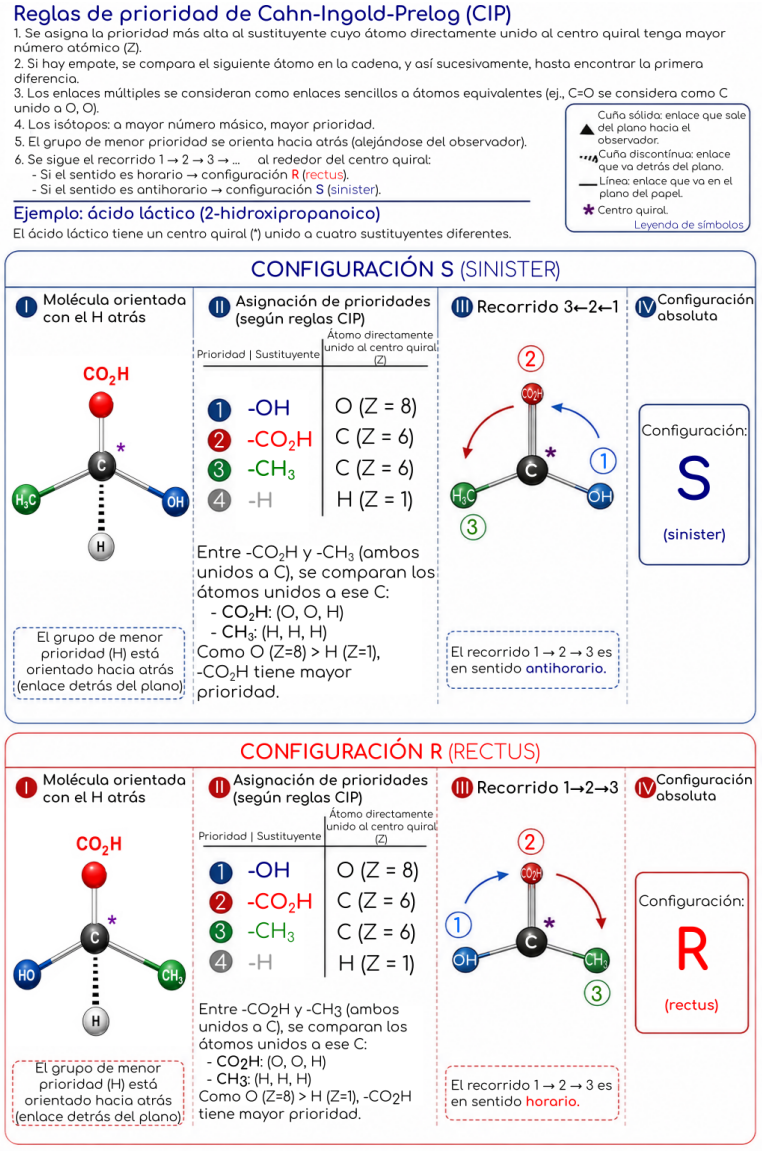


Figura 2. Determinación absoluta de las configuraciones R/S para el ácido láctico, según las reglas de Cahn–Ingold–Prelog.

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Así, en los sistemas biológicos, la homoquiralidad es una propiedad de asimetría funcional relacionada con el flujo de información a nivel celular (Carroll, 2009; Cruz-Rosas y cols., 2020). Se trata de una característica distintiva de la vida que se extiende a diferentes niveles de la organización biológica (Cruz-Rosas y cols., 2022; Inaki y cols., 2016). Durante los mecanismos de síntesis de biopolímeros informacionales, los ribosomas solo reconocen los L-aminoácidos (excepto la glicina, que es aquiral), mientras que la ARN-polimerasa y la ADN-polimerasa solo reconocen los nucleótidos que presentan D-ribosa y D-desoxirribosa, lo que se conoce como biohomoquiralidad. No obstante, se ha reportado la presencia de D-aminoácidos y de L-azúcares desempeñando papeles relevantes en algunos procesos biológicos (Bitchagno y cols., 2022; Forsman y Leino, 2011; Fuchs y cols., 2005; Genchi, 2017). Los casos en donde se ha logrado la síntesis de proteínas y ácidos nucleicos espejo —es decir, polimerizando D-aminoácidos y L-nucleótidos— ocurren en condiciones de laboratorio, donde ha sido indispensable el uso de enzimas sintéticas también espejo (Harrison y cols., 2023; Young y cols., 2019).

De este modo, la homoquiralidad presente en la síntesis de proteínas y ácidos nucleicos no se mantiene de manera estricta fuera de estos procesos. Sin embargo, el sesgo en el uso de uno de los enantiómeros de las moléculas quirales sí es una característica constante de los sistemas biológicos (Franco-Rodríguez y cols., 2023). De igual forma, existen sistemas inorgánicos que presentan asimetría quiral, exhibiendo sesgos a favor de la configuración derecha o izquierda que van desde las fuerzas débiles en el interior de los átomos hasta el sentido de giro en las galaxias espirales como la Vía Láctea (Pavlov y Klabunovskii, 2014), lo cual evidencia una asimetría quiral general en la naturaleza.

La condición estable, desordenada y más probable de un sistema quiral es la racémica, que en una reacción química se refiere al estado equimolar de ambos enantiómeros (50% izquierdos y 50% derechos). Es evidente, por lo tanto, que la biohomoquiralidad es una condición de asimetría y orden molecular en la biología. Incluso los sistemas biológicos no vivos, como los virus, necesitan ser homoquirales para interactuar con las células que infectan.

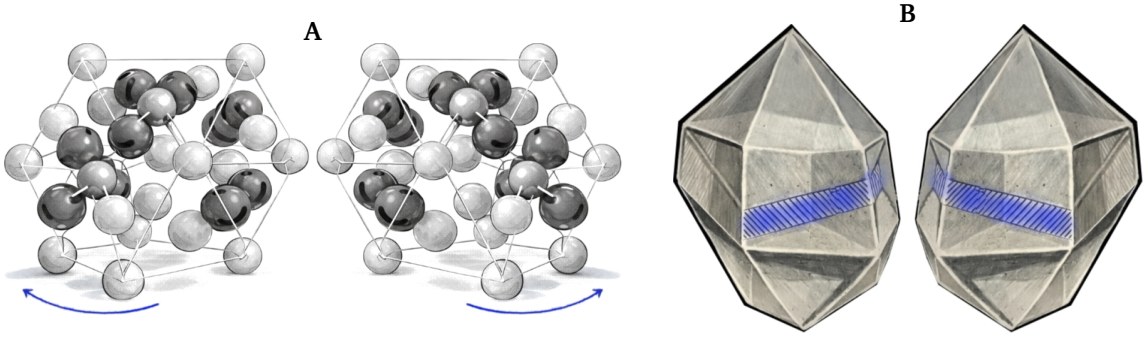


Figura 3. Esquema ilustrativo de quiralidad observada en cristales. A) Enantiómeros donde la quiralidad emerge como consecuencia del arreglo en el espacio de las unidades químicas. B) Enantiómeros en donde la quiralidad se observa en bandas inclinadas sobre la superficie de una de sus caras.

Por su parte, en los sistemas cristalinos de compuestos inorgánicos, donde el orden molecular sigue un patrón periódico, la quiralidad no reside necesariamente en las unidades químicas individuales, sino que emerge como una propiedad colectiva del arreglo espacial de la red del cristal y de su grupo de simetría (Flack, 2003; Valentín-Pérez y cols., 2022). Estos arreglos pueden ocurrir en forma de hélices a favor o en contra del movimiento de las manecillas del reloj, como en el clorato de sodio ($NaClO_3$) (Dickinson y Goodhue, 1921); o formando bandas en una o varias caras del cristal que pueden inclinarse hacia la izquierda o la derecha respecto al punto de referencia del observador, como en el caso del tartrato de amonio y sodio en sus caras hemiédricas (Gal, 2011) (Figura 3). En estos casos, cada versión del cristal obtenido resulta una imagen especular de la otra, por lo que se les denomina

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

enantiomorfos (Flack, 2003). Un aspecto relevante es que esta quiralidad se da a nivel supramolecular, incluso con relativa independencia de la quiralidad de las unidades que componen la red cristalina; tal es el caso del ya referido clorato de sodio, una molécula aquiral que da paso a una red helicoidal quiral. Este ejemplo demuestra que la quiralidad es una propiedad emergente que depende del arreglo espacial de los componentes de un sistema. Así, la quiralidad puede observarse a diferentes escalas de organización en la naturaleza, sin que esta propiedad exista necesariamente en la escala anterior.

La emergencia de la quiralidad en un sistema molecular depende de fuerzas fisicoquímicas y procesos que pudieron haber incidido en la Tierra prebiótica para influir en el origen o en las primeras etapas evolutivas de la vida, determinando desde muy temprano el posterior desarrollo hacia la biohomoquiralidad actual. Por lo tanto, el estudio de estas fuerzas y procesos que dan paso a la quiralidad en arreglos moleculares puede aportar claves sobre el proceso que condujo al desarrollo de los sistemas vivos. Más aún, las investigaciones centradas en los mecanismos que inducen la asimetría quiral en sistemas moleculares son de sumo interés para entender el origen y funcionamiento de los procesos biológicos que presentan quiralidad; esto tiene implicaciones no solo teóricas para el origen de la vida, sino también prácticas.

Ejemplo de esto es el desarrollo de terapias médicas basadas en el hecho de que la biohomoquiralidad representa un orden estructural fundamental en los seres vivos que permite el reconocimiento estereoespecífico entre biomoléculas. Este principio ha sido aprovechado para el diseño de nanomateriales quirales capaces de reconocer selectivamente estructuras moleculares de interés biomédico, con aplicaciones en diagnóstico, liberación dirigida de fármacos y terapias médicas (Sun y cols., 2026; Zhao y cols., 2024). El desarrollo de fármacos específicos también es un campo de desarrollo basado en la quiralidad molecular de los sistemas vivos, donde se busca minimizar los efectos secundarios y potenciar los efectos deseados en el organismo por medio del estereoisómero con la actividad fisiológica adecuada (Nguyen y cols., 2006).

Con estos objetivos, diversos grupos de investigación emplean modelos moleculares simples, como la formación de cristales quirales, para entender de qué formas puede inducirse la ruptura de la simetría quiral e investigar sus implicaciones en la biología. Sobre esta base, en el presente trabajo mostramos la relevancia del estudio de la cristalización del $NaClO_3$, así como los mecanismos de ruptura de su simetría quiral como un modelo experimental sencillo y útil para aproximarnos a las posibles condiciones de asimetría en las que se ensamblaron los primeros sistemas vivos.

2 El Clorato de Sodio ($NaClO_3$): un modelo experimental

El clorato de sodio es una sal inorgánica aquiral que cristaliza formando conglomerados quirales. Esta quiralidad no reside en las unidades químicas individuales, sino que emerge como consecuencia del arreglo tridimensional de los iones Na^+ y ClO_3^- en la red cristalina. En particular, el cristal pertenece a un grupo espacial quiral ($P2_13$), en el que las unidades estructurales se organizan a lo largo de ejes helicoidales, dando lugar a estructuras enantiomorfas de mano izquierda o derecha (Buhse y cols., 2021; Flack, 2003; Florent y cols., 2023).

Una consecuencia importante de esta disposición es que los cristales presentan actividad óptica, es decir, son capaces de rotar el plano de polarización de la luz linealmente polarizada. Como resultado, cuando se observan con lentes polarizadas, los cristales de distinta lateralidad interactúan de forma diferente con la luz, permitiendo distinguir visualmente entre conglomerados quirales opuestos.

Si las placas polarizadas están inicialmente cruzadas (en planos paralelos pero desfasadas de manera perpendicular, a 90° una con respecto de la otra) y se gira la placa superior (analizadora) hacia la derecha, la luz polarizada atravesará la mezcla de cristales y entonces los L-cristales del $NaClO_3$ se verán más luminosos que los D-cristales; si el giro es hacia la izquierda, se invertirá la tonalidad de los conglomerados, es decir, los D-cristales se observarán con más brillo. Lo anterior se ilustra en la Figura 4 con las flechas girando a la derecha e izquierda y el correspondiente resultado en el par de cristales: las imágenes inferiores muestran, cada una, las tonalidades de los conglomerados L o D,

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

debido a que cada enantiomorfo interactúa de forma diferente con el sentido de la luz polarizada que atraviesa la mezcla de cristales.

No existe una relación directa entre el giro horario o antihorario de la lente con la quiralidad de cada enantiomorfo, por lo que este no representa un método para determinar la configuración de cada conglomerado, sino que se trata de una técnica para discernir entre los cristales de una mano y de otra, e incluso entre cristales aquirales (Niinomi y cols., 2014).

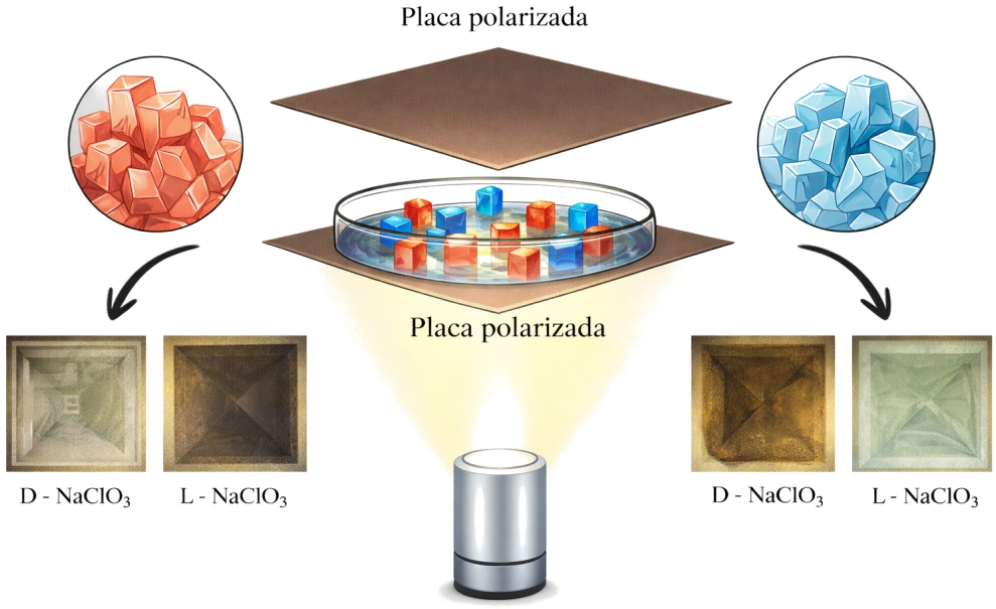


Figura 4. Interacción asimétrica de los cristales L y D del $NaClO_3$ con la luz polarizada linealmente. Cuando la placa polarizada superior se gira en sentido horario (derecha) con respecto de la placa polarizada inferior, los cristales L-$NaClO_3$ se observan más luminosos. Cuando el giro relativo de la placa polarizada superior es antihorario (izquierda), ahora son los cristales D-$NaClO_3$ los que se observan luminosos. Imagen original: Heidi García Quintana. Los colores solo son ilustrativos.

Un comportamiento interesante en la cristalización del $NaClO_3$ es que al preparar una solución sobresaturada a partir de cristales previamente formados —ya sea que estuviese compuesta únicamente por cristales izquierdos, únicamente por derechos o por una mezcla racémica—, la quiralidad asociada a la red cristalina se pierde por completo tras la disolución. Como resultado, la formación de nuevos cristales da paso a una mezcla racémica. Esto demuestra que el racemato es el estado de equilibrio de la dinámica, al cual se regresa de manera recurrente. Sin embargo, bajo ciertas condiciones, dicho equilibrio puede romperse, lo que conduce a un crecimiento no racémico en el que predomina alguno de los cristales enantiomorfos (Buhse y cols., 2021; Noble-Terán y cols., 2023).

3 Ruptura de la simetría quiral y crecimiento no racémico

El crecimiento no racémico se refiere a cualquier proceso que resulta en un exceso significativo de un enantiómero sobre el otro (en este caso, un enantiomorfo de cierta mano o lateralidad sobre el otro). Existen mecanismos que pueden causarlo, tanto estocásticos (aleatorios) como deterministas.

3.1 El efecto de la conglomeración espontánea y la desracemización de Viedma

La desracemización de Viedma opera sobre la formación espontánea de cristales quirales resultantes de una dinámica de conglomeración, fragmentación

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

y reciclaje, donde un núcleo quiral induce la incorporación (adsorción) de unidades estructurales compatibles con la configuración del enantiomorfo en formación, dando paso a cristales con una quiralidad definida. La cristalización del $NaClO_3$ genera, en reposo, conglomerados de mano izquierda y de mano derecha en un estado simétrico (racémico). A partir de esta conglomeración espontánea, el mecanismo de desracemización de Viedma (Viedma, 2005) permite obtener una población homoquiral de cristales (100 % de enantiomorfos de la misma lateralidad) a partir de una disolución sobresaturada y racémica.

El sistema se somete a un ciclo continuo de disolución y crecimiento de los conglomerados. Esto puede inducirse de dos maneras: la primera es por medio de la ruptura mecánica de los cristales mediante esferas de vidrio que actúan como molino bajo la agitación del sistema; esto causa que los conglomerados pequeños se disuelvan al ser menos estables, favoreciendo así un proceso de maduración de Ostwald en el cual el material disuelto se incorpora a los cristales de mayor tamaño (los "alimenta") y promueve su crecimiento (Noorduin y cols., 2009). La otra vía es mediante fluctuaciones térmicas, donde los ciclos de calentamiento y enfriamiento inducen la disolución y el crecimiento de los cristales, respectivamente (Noorduin y cols., 2008).

La clave de este mecanismo radica en que los iones de $NaClO_3$ pasan de formar parte del cristal a la fase acuosa (al disolverse) para volver a ser adsorbidos por alguno de los dos enantiomorfos. Esta interconversión sólido-líquido-sólido es reversible y no presenta preferencia alguna para formar cristales de una quiralidad en particular, pues el $NaClO_3$ es aquiral en disolución y sus unidades iónicas (Na^+ y ClO_3^-) pueden incorporarse a cualquiera de los enantiomorfos. Sin embargo, debido a fluctuaciones estocásticas, en un momento dado puede haber un ligero exceso a favor de una lateralidad. Al continuar el ciclo de disolución y crecimiento de cristales, aquellos enantiomorfos que se encuentren en una mayor proporción tendrán mayor probabilidad de adsorber los iones liberados por los cristales que se hallen por debajo de un tamaño crítico (Noorduin y cols., 2008). Esta dinámica representa una ruptura de la simetría en la formación de ambos enantiomorfos y un asa de retroalimentación positiva que conduce a la desaparición completa del enantiomorfo minoritario y a la obtención de una población homoquiral de cristales (Noble-Terán y cols., 2023).

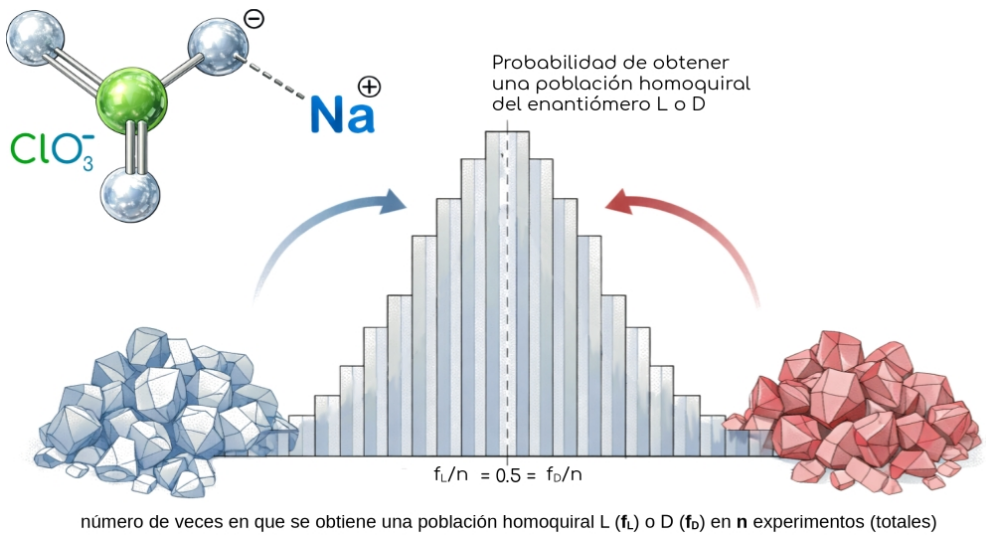


Figura 5. Ejemplo de distribución binomial. Se muestra un histograma idealizado con probabilidades simétricas para obtener poblaciones homoquirales de cristales izquierdos y cristales derechos, cuya máxima probabilidad para ambos es de 50 %. Los colores solo son ilustrativos.

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

El mecanismo de Viedma es estocástico, dando paso a poblaciones homoquirales del enantiomorfo izquierdo o del derecho en una distribución de probabilidad binomial, sin preferencia por alguna lateralidad (Kondepudi y cols., 1990; Viedma, 2005) (Figura 5). Sin embargo, es posible controlar la dirección en la ruptura de la simetría quiral, volviendo determinista al sistema, ya sea por medio de un sentido unidireccional en la agitación de la solución (Ribó y cols., 2001) o empleando iniciadores quirales —también llamados semillas quirales—, como lo son cristales del mismo compuesto o moléculas disueltas en el medio (Putman y Armstrong, 2022). En este sentido, el control sobre la lateralidad del estado homoquiral obtenido tiene implicaciones no solo teóricas para el origen de la vida, sino también prácticas, por ejemplo, en las industrias alimentaria y farmacéutica.

3.2 Ruptura de la simetría por nucleación secundaria

Este mecanismo, observado en sales como el $NaClO_3$, se basa en el crecimiento de cristales a partir de otros que se han formado previamente. En la nucleación primaria, la formación estocástica de los primeros cristales da paso a una mezcla racémica de estos (Kondepudi y cols., 1990).

Cuando los cristales iniciales continúan creciendo en la disolución, pueden inducir una nucleación secundaria: pequeños fragmentos desprendidos de los cristales parentales funcionan como nuevos núcleos para la cristalización, heredando su estructura y, por lo tanto, su quiralidad (Noorduin y cols., 2008). Este mecanismo puede representar un recurso de asimetría si un cristal de mano izquierda o uno de mano derecha se vuelve ligeramente más grande o activo al incorporar más iones a su red cristalina, por lo que generará más núcleos secundarios de la misma quiralidad. Los nuevos cristales, a su vez, generarán más núcleos de cristalización con la misma lateralidad, siendo así un proceso autocatalítico.

Este efecto en cascada puede conducir rápidamente a la predominancia de un solo enantiomorfo en el medio de cristalización. Bajo condiciones adecuadas, estos mecanismos pueden crear poblaciones de cristales con purezas enantioméricas cercanas al 100 % (Viedma, 2005).

4 Algunas implicaciones para las industrias farmacéutica y alimenticia

La obtención de sustancias enantioméricamente puras en la industria farmacéutica es relevante ya que, como se ha mencionado antes, los sistemas biológicos presentan un uso y reconocimiento estereoespecífico de las moléculas quirales. Como consecuencia, los enantiómeros de un mismo fármaco pueden presentar propiedades farmacológicas diferentes en el organismo.

Existen varios ejemplos, siendo uno de los más famosos el caso de la talidomida, que causa malformaciones en el desarrollo embrionario si se administra el *S*-enantiómero, aunque ambos enantiómeros se interconvierten en condiciones fisiológicas, racemizando *in vivo*, lo que dificulta su uso como compuesto enantioméricamente puro (Hutt y Tan, 1996). Otro ejemplo es el del ibuprofeno, donde el *S*-enantiómero es la forma fisiológicamente activa en los humanos (y, en general, en los mamíferos). Este antiinflamatorio puede obtenerse como un racemato, donde el *R*-enantiómero (derecho) es fisiológicamente inactivo, pero es convertido al *S*-enantiómero en el plasma sanguíneo. Si se administra la mezcla racémica, la dosis efectiva se eleva ya que el *R*-enantiómero se convierte parcialmente en la forma activa *S* en el organismo por enzimas hepáticas, lo que puede generar daño renal (Nguyen y cols., 2006).

En muchos casos, la obtención de fármacos enantiopuros se realiza mediante síntesis enantioselectiva o resolución quiral. Desde un punto de vista alternativo, los procesos de cristalización quiral pueden ser explorados como posibles métodos para la separación de enantiómeros; sin embargo, la mayoría de los compuestos orgánicos quirales, incluido el ibuprofeno, cristalizan como compuestos racémicos (tanto el *S*- como el *R*-ibuprofeno forman parte de la misma red del cristal) y no como conglomerados, lo que limita la aplicación directa de estos métodos. Las investigaciones en los mecanismos de nucleación asimétrica, como el mecanismo de Viedma o la cristalización secundaria, constituyen un campo abierto para la búsqueda de procedimientos industriales para obtener conglomerados de estas sustancias con elevada pureza enantiomérica.

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

La situación es similar en la industria de los alimentos, pues las moléculas quirales son reconocidas de manera diferente según el enantiómero por parte de los quimiorreceptores sensoriales. Debido a que el olfato y el gusto están estrechamente relacionados, podemos encontrar varios ejemplos, desde el clásico reconocimiento del limoneno, donde suele afirmarse que el $S(-)$-limoneno es percibido como el aroma a limón, mientras que el $R(+)$-limoneno provoca el reconocimiento del aroma a naranja (Brenna y cols., 2003). Sin embargo, la validez de este ejemplo tan difundido ha sido cuestionada. En un estudio acerca de las características de los aromas, se argumenta que el $R(+)$-limoneno es el terpeno presente en el aceite de todos los frutos cítricos (limón y naranja incluidos), y que la obtención del $S(-)$-limoneno a partir de la cáscara del limón pudo haberse contaminado con citral, lo que produjo el resultado reportado como el aroma a limón, siendo un artefacto del método empleado y un error que se ha mantenido en la literatura científica (Sell, 2014).

Dejando por ahora a un lado este debate acerca del limoneno, las moléculas quirales orgánicas siempre se encuentran en proporciones asimétricas en los seres vivos. El mentol, obtenido de especies de plantas herbáceas del género *Mentha*, es producido de manera natural como $(-)$-mentol, que corresponde a la configuración $1R,3R,4S$, pues tiene tres centros quirales. Esta notación indica que cada uno de los tres centros quirales de la molécula presenta una configuración absoluta R o S que describe la disposición tridimensional de los sustituyentes alrededor de cada centro quiral, dando paso a 8 isómeros estructurales. El $(-)$-mentol es el responsable del sabor y la sensación de frescura al ser reconocido por los quimiorreceptores sensoriales de las mucosas. El $(+)$-mentol, que corresponde a la configuración $1S,3S,4R$, es percibido como un sabor artificial, similar a medicina, y además interfiere con el reconocimiento del $(-)$-mentol por los quimiorreceptores cuando se administran juntos.

A pesar de que la obtención de $(-)$-mentol a partir de la extracción del aceite de la menta (principalmente de la especie *Mentha canadensis*) es el principal recurso de este monoterpenoide, su síntesis industrial ocurre mediante precursores quirales como el $(+)$-limoneno, o aquirales como el β-pineno, y la ulterior obtención del compuesto puro mediante la cristalización del $(-)$-mentol (Kamatou y cols., 2013). En este sentido, la investigación de los mecanismos de formación de cristales con elevada pureza enantiomérica, como el mecanismo de Viedma o la cristalización secundaria, representa un área que puede dar paso a nuevos procesos que sean factibles para esta actividad económica.

5 Implicaciones para el origen de la quiralidad biológica

En lo que se refiere al origen de la biohomoquiralidad, tanto el mecanismo de Viedma como la nucleación secundaria demuestran que procesos simples basados en ciclos de cristalización y disolución sobre fluctuaciones estadísticas pueden conducir a estados homoquirales en sistemas inorgánicos. Esto pudo significar la presencia de sitios o localidades con asimetría quiral sobre superficies minerales en la Tierra prebiótica, o bien en el medio donde los primeros sistemas vivos se ensamblaron y comenzaron su proceso evolutivo. La transferencia del sesgo quiral de los cristales inorgánicos a moléculas orgánicas como los aminoácidos y los azúcares es un campo de investigación que puede enmarcarse dentro del principio de simetría de Curie: "Cuando ciertas causas producen ciertos efectos, los elementos de simetría de las causas deben ser encontrados en los efectos producidos" (citado por Chalmers, 1970). De este modo, la asimetría quiral inorgánica impondría restricciones geométricas a las dinámicas, sesgando los sistemas moleculares orgánicos en favor de alguno de los enantiómeros.

La ruptura de la simetría quiral en la cristalización del $NaClO_3$ demuestra que existen procesos simples, independientes de las dinámicas biológicas, que conducen a estados homoquirales. Esta asimetría en sistemas inorgánicos pudo contribuir a determinar la asimetría quiral en la biología en uno de dos escenarios generales: el primero, como una condición previa al origen de la vida; el segundo, como un factor ambiental que influyó en el proceso evolutivo durante las primeras etapas posteriores al origen de los sistemas vivos. En ambos casos, una hipótesis que conecta estos fenómenos con la vida propone que los cristales quirales pudieron actuar como los primeros agentes de selección y amplificación de la quiralidad molecular, ya sea antes o después del origen de la vida.

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

El crecimiento no racémico de minerales quirales o de compuestos orgánicos prebióticos (como aminoácidos que forman conglomerados) pudo proporcionar los primeros entornos locales en la Tierra primitiva con un exceso enantiomérico significativo. A diferencia de otras hipótesis, como la panspermia molecular (Bonner, 1991; Bonner y Rubenstein, 1987; Rubenstein y cols., 1983) o la de Oparin–Haldane (Schopf, 2024), la ruptura de la simetría quiral en la cristalización del $NaClO_3$ no necesitó de un rayo cósmico o de una fuente de luz polarizada circularmente para inducir un crecimiento asimétrico; la fluctuación estadística y la posterior amplificación fueron suficientes.

Uno de los mecanismos más sencillos es que las superficies cristalinas con asimetría quiral hubieran funcionado como superficies de reacción, presentando una interacción asimétrica —debido a afinidades en la geometría molecular— hacia uno de los enantiómeros de las moléculas orgánicas. Por ejemplo, un cristal homoquiral podría favorecer la unión y polimerización de aminoácidos (como los *L*-aminoácidos) o de azúcares (como la *D*-ribosa y la *D*-desoxirribosa). Esto habría llevado a la formación de los primeros oligopéptidos u oligonucleótidos con un sesgo quiral que luego, una vez que la vida molecular se volvió autónoma, perpetuó esta asimetría inicial (Vogl, 2011).

Diversos grupos de investigación han reportado la adsorción selectiva de uno de los enantiómeros por parte de una superficie mineral con asimetría quiral. Algunos ejemplos son la adsorción preferente de *L*-aminoácidos por parte de superficies como la calcita (Hazen y cols., 2001), o la adsorción selectiva de *D*-ribosa sobre superficies minerales (Delidovich y cols., 2014).

En este mismo sentido, la amplificación cruzada pudo jugar un papel relevante. Un pequeño exceso de *L*-aminoácidos o *D*-ribosa, generado quizás por una población homoquiral de cristales inorgánicos, podría haber sido amplificado posteriormente por otros mecanismos (como la catálisis asimétrica en superficies minerales o en sistemas de reacciones autocatalíticas como la reacción de Soai), hasta llegar a la homoquiralidad que observamos actualmente (Barron, 2008).

6 Conclusión: asimetría inorgánica y asimetría biológica

La cristalización del $NaClO_3$ en conglomerados enantiomorfos evidencia que, a partir de un sistema molecular aquiral, la quiralidad puede emerger a nivel supramolecular. Además, la nucleación secundaria y la desracemización de Viedma demuestran que una condición inicial racémica puede generar un estado de homoquiralidad pura mediante procesos fisicoquímicos simples (cristalización, disolución, energía mecánica o térmica). No se necesita una influencia asimétrica externa inicial, sino únicamente fluctuaciones estadísticas, lo que podría representar un mecanismo abiótico para inducir la ruptura de la simetría quiral en moléculas orgánicas —particularmente en los aminoácidos y los azúcares pentosas (como la ribosa y la desoxirribosa)— y determinar el sesgo quiral en los sistemas biológicos.

Por lo tanto, es plausible que en la Tierra prebiótica, en las superficies de minerales sometidas a ciclos de humedad y temperatura, o en sistemas hidrotermales, procesos de cristalización análogos a la desracemización de Viedma actuaran como el punto de inflexión que sesgó la dinámica hacia la prevalencia de los *L*-aminoácidos o *D*-azúcares. Aunque estos mecanismos explican la generación y amplificación de la asimetría quiral en sistemas físicos simples, la transición hacia su incorporación y fijación en sistemas químicos autorreplicantes constituye aún un problema en el estudio del origen de la vida. No obstante, el escenario aquí presentado pudo ser parte de aquel que transformó la asimetría de la química abiótica en la asimetría funcional de los seres vivos, esto último en el sentido de que los organismos mantienen sus procesos biológicos básicos debido a que se encuentran organizados sobre la base de su condición homoquiral (Cruz-Rosas y cols., 2022; Cruz-Rosas y Miramontes, 2021).

Agradecimientos

Los autores queremos agradecer a nuestro mentor, colega y amigo Thomas Buhse, quien falleció durante la elaboración del presente escrito. Asimismo, queremos agradecer a los dos revisores anónimos por los comentarios y sugerencias realizados para mejorar el manuscrito inicial. Agradecemos a todo

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

el equipo de *La Granja* por el manejo académico y editorial del presente artículo.

Este trabajo forma parte del proyecto de investigación en ciencia básica: CBF-2025-G-28 "Cinética y dinámica de las desracemizaciones tipo Viedma: Fundamentos de la ruptura espontánea de la simetría quiral", financiado por la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), México.

Declaración de uso de inteligencia artificial

Los autores DECLARAN que, durante la preparación del artículo titulado «Ruptura de la simetría quiral en cristales de $NaClO_3$ como modelo para el estudio de la homoquiralidad biológica», se utilizaron herramientas de inteligencia artificial generativa exclusivamente para generar y/o editar las imágenes que acompañan al presente manuscrito. La versión final de dichos elementos visuales es producto de la edición manual por parte de los autores. Estas herramientas no fueron empleadas para el análisis, interpretación de datos, generación de resultados, elaboración de conclusiones ni sustitución del criterio académico y científico de los autores.

Los autores asumen plena responsabilidad por el contenido, la originalidad, la integridad y la versión final del artículo.

Contribución de los autores

H.I.C.R.: Conceptualización, supervisión, visualización, escritura-borrador original, escritura-revisión y edición. **M.E.N.T.:** Supervisión, visualización, escritura-revisión y edición. **J.M.C.:** Supervisión, visualización, escritura-revisión y edición. **H.G.Q.:** Visualización, escritura-revisión y edición. **M.A.C.V.:** Visualización, escritura-revisión y edición. **F.C.R.H.:** Visualización, escritura-revisión y edición. **T.B.:** Supervisión, visualización, escritura-revisión y edición.

Referencias

Barron, L. D. (2008). Chirality and life. *Space Science Reviews*, *135*, 187–201. Online: https://doi.org/10.1007/s11214-007-9254-7

Bitchagno, G. T. M., Nchiozem-Ngnitedem, V.-A., Melchert, D., y Fobofou, S. A. (2022). Demystifying racemic natural products in the homochiral world. *Nature Reviews Chemistry*, *6*, 806–822. Online: https://doi.org/10.1038/s41570-022-00431-4

Bonner, W. A. (1991). Terrestrial and extraterrestrial sources of molecular homochirality. *Origins of Life and Evolution of Biospheres*, *21*(5), 407–420. Online: https://doi.org/10.1007/BF01808311

Bonner, W. A., y Rubenstein, E. (1987). Supernovae, neutron stars and biomolecular chirality. *BioSystems*, *20*(1), 99–111. Online: https://doi.org/10.1016/0303-2647(87)90025-6

Brenna, E., Fuganti, C., y Serra, S. (2003). Enantioselective perception of chiral odorants. *Tetrahedron: Asymmetry*, *14*, 1–42. Online: https://doi.org/10.1016/S0957-4166(02)00713-9

Buhse, T., Cruz, J.-M., Noble-Terán, M. E., Hochberg, D., Ribó, J. M., Crusats, J., y Micheau, J.-C. (2021). Spontaneous deracemizations. *Chemical Reviews*, *121*, 2147–2229. Online: https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.0c00819

Carroll, J. D. (2009). A new definition of life. *Chirality*, *21*(3), 354–358. Online: https://doi.org/10.1002/chir.20590

Chalmers, A. F. (1970). Curie's principle. *The British Journal for the Philosophy of Science*, *21*, 133–148. Online: https://doi.org/10.1093/bjps/21.2.133

Cleaves, H. J. (2023). Cahn–ingold–prelog rules. En *Encyclopedia of astrobiology* (pp. 450–450). Cham: Springer. Online: https://doi.org/10.1007/978-3-662-65093-6_295

Cruz-Rosas, H. I., y Miramontes, P. (2021). Spatial information in the emergence of life. *Frontiers in Genetics*, *12*, 672780. Online: https://doi.org/10.3389/fgene.2021.672780

Cruz-Rosas, H. I., Noble-Terán, M. E., Cruz, J. M., y Buhse, T. (2022). Quiralidad biológica: la asimetría funcional de la vida. *Inventio, la génesis de la cultura universitaria en Morelos*, *18*(45),

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

1–9. Online: https://doi.org/10.30973/inventio/2022.18.45/3

Cruz-Rosas, H. I., Riquelme, F., Ramírez-Padrón, A., Buhse, T., Cocho, G., y Miramontes, P. (2020). Molecular shape as a key source of prebiotic information. *Journal of Theoretical Biology*, *499*, 110316. Online: https://doi.org/10.1016/j.jtbi.2020.110316

Delidovich, I. V., Simonov, A. N., Taran, O. P., y Parmon, V. N. (2014). Catalytic formation of monosaccharides: from the formose reaction towards selective synthesis. *ChemSusChem*, *7*, 1833–1846. Online: https://doi.org/10.1002/cssc.201400040

Dickinson, R. G., y Goodhue, E. A. (1921). The crystal structures of sodium chlorate and sodium bromate. *Journal of the American Chemical Society*, *43*, 2045–2055. Online: https://doi.org/10.1021/ja01442a008

Flack, H. D. (2003). Chiral and achiral crystal structures. *Helvetica Chimica Acta*, *86*, 905–921. Online: https://doi.org/10.1002/hlca.200390109

Florent, S. R., Couvrat, N., Bilot, C., Marinel, S., Malo, S., y Coquerel, G. F. (2023). *The solid solution between $NaClO_3$ and $NaBrO_3$ revisited.* Online: https://doi.org/10.20944/preprints202306.1610.v1 (Preprint)

Forsman, J. J., y Leino, R. (2011). L-pentoses in biological and medicinal applications. *Chemical Reviews*, *111*, 3334–3357. Online: https://doi.org/10.1021/cr1002563

Franco-Rodríguez, F. C., Gonzáles-Morales, H., Heredia-Barbero, A., Montoya, L., y Reyes-Medina, Y. (2023). Quiralidad en las ciencias naturales: un acercamiento a distintas escalas. *LA GRANJA. Revista de Ciencias de la Vida*, *37*, 8–22. Online: https://doi.org/10.17163/lgr.n37.2023.01

Fuchs, S. A., Berger, R., Klomp, L. W. J., y de Koning, T. J. (2005). D-amino acids in the central nervous system in health and disease. *Molecular Genetics and Metabolism*, *85*, 168–180. Online: https://doi.org/10.1016/j.ymgme.2005.03.003

Gal, J. (2011). Louis pasteur, language, and molecular chirality. i. background and dissymmetry. *Chirality*, *23*, 1–16. Online: https://doi.org/10.1002/chir.20866

Genchi, G. (2017). An overview on D-amino acids. *Amino Acids*, *49*, 1521–1533. Online: https://doi.org/10.1007/s00726-017-2459-5

Harrison, K., Mackay, A. S., Kambanis, L., Maxwell, J. W. C., y Payne, R. J. (2023). Synthesis and applications of mirror-image proteins. *Nature Reviews Chemistry*, *7*, 383–404. Online: https://doi.org/10.1038/s41570-023-00493-y

Hazen, R. M., Filley, T. R., y Goodfriend, G. A. (2001). Selective adsorption of L- and D-amino acids on calcite: implications for biochemical homochirality. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *98*(10), 5487–5490. Online: https://doi.org/10.1073/pnas.101085998

Hutt, A. J., y Tan, S. C. (1996). Drug chirality and its clinical significance. *Drugs*, *52*, 1–12. Online: https://doi.org/10.2165/00003495-199600525-00003

Inaki, M., Liu, J., y Matsuno, K. (2016). Cell chirality: its origin and roles in left–right asymmetric development. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, *371*, 20150403. Online: https://doi.org/10.1098/rstb.2015.0403

Kamatou, G. P. P., Vermaak, I., Viljoen, A. M., y Lawrence, B. M. (2013). Menthol: a simple monoterpene with remarkable biological properties. *Phytochemistry*, *96*, 15–25. Online: https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2013.08.005

Kondepudi, D. K., Kaufman, R. J., y Singh, N. (1990). Chiral symmetry breaking in sodium chlorate crystallization. *Science*, *250*, 975–976. Online: https://doi.org/10.1126/science.250.4983.975

Nguyen, L. A., He, H., y Pham-Huy, C. (2006). Chiral drugs: an overview. *International Journal of Biomedical Science*, *2*(2), 85–100. Online: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23674971/

Niinomi, H., Miura, H., Kimura, Y., Uwaha, M., Katsuno, H., Harada, S., ... Tsukamoto, K. (2014). Emergence and amplification of chirality via achiral–chiral polymorphic transformation in sodium chlorate solution growth. *Crystal Growth & Design*, *14*, 3596–3602. Online: https://doi.org/10.1021/cg500527t

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Noble-Terán, M. E., Cruz, J., Cruz-Rosas, H. I., Buhse, T., y Micheau, J. (2023). A complex reaction network model for spontaneous mirror symmetry breaking in viedma deracemizations. *ChemPhysChem*, *24*, e202300318. Online: https://doi.org/10.1002/cphc.202300318

Noorduin, W. L., Meekes, H., van Enckevort, W. J. P., Millemaggi, A., Leeman, M., Kaptein, B., … Vlieg, E. (2008). Complete deracemization by attrition-enhanced ostwald ripening elucidated. *Angewandte Chemie International Edition*, *47*, 6445–6447. Online: https://doi.org/10.1002/anie.200801846

Noorduin, W. L., Vlieg, E., Kellogg, R. M., y Kaptein, B. (2009). From ostwald ripening to single chirality. *Angewandte Chemie International Edition*, *48*, 9600–9606. Online: https://doi.org/10.1002/anie.200905215

Pavlov, V., y Klabunovskii, E. (2014). Homochirality origin in nature: possible versions. *Current Organic Chemistry*, *18*(1), 93–114. Online: https://doi.org/10.2174/13852728113179990033

Putman, J. I., y Armstrong, D. W. (2022). Recent advances in the field of chiral crystallization. *Chirality*, *34*, 1338–1354. Online: https://doi.org/10.1002/chir.23492

Ribó, J. M., Crusats, J., Sagués, F., Claret, J., y Rubires, R. (2001). Chiral sign induction by vortices during the formation of mesophases in stirred solutions. *Science*, *292*, 2063–2066. Online: https://doi.org/10.1126/science.1060835

Rubenstein, E., Bonner, W. A., Noyes, H. P., y Brown, G. S. (1983). Supernovae and life. *Nature*, *306*(5939), 118. Online: https://doi.org/10.1038/306118a0

Schopf, J. W. (2024). Pioneers of origin of life studies—darwin, oparin, haldane, miller, oró—and the oldest known records of life. *Life*, *14*(10), 1345. Online: https://doi.org/10.3390/life14101345

Sell, C. S. (2014). Analysis and characterisation of odour. En *Chemistry and the sense of smell* (pp. 188–208). Chichester: John Wiley & Sons, Ltd. Online: https://doi.org/10.1002/9781118522981.ch3

Sun, L., Zhang, Y., Yang, Z., Zhang, Y., Dong, Q., Zhang, Z., y Zhang, Q. (2026). Recent advances in synthesis and biomedical applications of structurally chiral plasmonic nanomaterials. *Coordination Chemistry Reviews*, *556*, 217660. Online: https://doi.org/10.1016/j.ccr.2026.217660

Valentín-Pérez, A., Rosa, P., Hillard, E. A., y Giorgi, M. (2022). Chirality determination in crystals. *Chirality*, *34*, 163–181. Online: https://doi.org/10.1002/chir.23377

Viedma, C. (2005). Chiral symmetry breaking during crystallization: complete chiral purity induced by nonlinear autocatalysis and recycling. *Physical Review Letters*, *94*, 065504. Online: https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.94.065504

Vogl, O. (2011). Chiral crystallization and the origin of chiral life on earth. *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry*, *49*, 1299–1308. Online: https://doi.org/10.1002/pola.24548

Young, B. E., Kundu, N., y Sczepanski, J. T. (2019). Mirror-image oligonucleotides: history and emerging applications. *Chemistry – A European Journal*, *25*, 7981–7990. Online: https://doi.org/10.1002/chem.201900149

Zhao, L.-X., Chen, L.-L., Cheng, D., Wu, T.-Y., Fan, Y.-G., y Wang, Z.-Y. (2024). Potential application prospects of biomolecule-modified two-dimensional chiral nanomaterials in biomedicine. *ACS Biomaterials Science & Engineering*, *10*, 2022–2040. Online: https://doi.org/10.1021/acsbiomaterials.3c01871

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

La Granja: Revista de Ciencias de la Vida
pISSN:1390-3799; eISSN:1390-8596
https://doi.org/10.17163/lgr.n44.2026.02

Edición Especial / Special Issue
Quiralidad a diferentes escalas

Una mirada a los *D*-aminoácidos en los seres vivos

A look at *D*-Amino Acids in living beings

Josué Fabián Díaz Aguilar* y Mario Israel Hernández Alva

*Laboratorio de Evolución Química, Instituto de Ciencias Nucleares, Posgrado en Ciencias Biológicas, Universidad Nacional Autónoma de México. [*https://ror.org/01tmp8f25*]*

*Autor para correspondencia: josue.diaz@correo.nucleares.unam.mx

Manuscrito recibido el 26 de marzo de 2026. Aceptado, tras revisión el 22 de junio de 2026. Publicado el 1 de septiembre de 2026.

Resumen

La predominancia de los L-aminoácidos en los sistemas biológicos se ha considerado durante mucho tiempo como una característica definitoria de la vida. Sin embargo, la evidencia acumulada en las últimas décadas ha demostrado que los D-aminoácidos no son solo anomalías bioquímicas, sino moléculas biológicamente relevantes con funciones diversas y esenciales en todos los dominios de la vida. Esta revisión resume el conocimiento actual sobre la distribución, biosíntesis, metabolismo y funciones fisiológicas de los D-aminoácidos, destacando su importancia en contextos microbianos, animales y evolutivos. Los D-aminoácidos como la D-alanina y el D-glutamato en las bacterias son componentes integrales del peptidoglicano, contribuyendo a la integridad de la pared celular y a la resistencia a la degradación proteolítica. Más allá de sus funciones estructurales, varios D-aminoácidos actúan como moléculas de señalización para la formación de *biofilms* y la dinámica de las comunidades microbianas. En los eucariontes, particularmente en los mamíferos, han surgido la D-serina y el D-aspartato como neuromoduladores clave implicados en el neurodesarrollo y la regulación endocrina, con implicaciones crecientes en trastornos neurológicos y psiquiátricos. Además, la coexistencia de D-aminoácidos funcionales con un proteoma mayoritariamente basado en L-aminoácidos plantea preguntas fundamentales sobre el origen y el mantenimiento de la homoquiralidad biológica. Los mecanismos como las D-aminoacil-*tRNA* desaciclasas preservan activamente la homoquiralidad del proteoma, al tiempo que permiten la utilización selectiva de D-aminoácidos en rutas especializadas. En conjunto, los D-aminoácidos representan una dimensión crucial, aunque históricamente subestimada, de la química biológica, con implicaciones que van desde la fisiología microbiana hasta la neurociencia y el origen de la vida.

Palabras clave: Enantiómeros, evolución de aminoácidos, homoquiralidad, biofilm, racemasa, peptidoglicano.

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Abstract

The predominance of L-amino acids in biological systems has long been considered a defining feature of life. However, accumulating evidence over the past decades has demonstrated that D-amino acids are not merely biochemical anomalies, but biologically relevant molecules with diverse and essential functions across all domains of life. This review summarizes current knowledge on the distribution, biosynthesis, metabolism, and physiological roles of D-amino acids, highlighting their significance in microbial, animal, and evolutionary contexts. In bacteria, D-amino acids such as D-alanine and D-glutamate are integral components of peptidoglycan, contributing to cell wall integrity and resistance to proteolytic degradation. Beyond structural roles, several noncanonical D-amino acids act as signaling molecules to biofilm formation and microbial community dynamics. In eukaryotes, particularly in mammals, D-serine and D-aspartate have emerged as key neuromodulators involved in synaptic plasticity, neurodevelopment, and endocrine regulation, with growing implications in neurological and psychiatric disorders. Furthermore, the coexistence of functional D-amino acids with the largely L-based proteome raises fundamental questions about the origin and maintenance of biological homochirality. Mechanisms such as stereospecific aminoacyl-*tRNA* synthetases and D-aminoacyl-*tRNA* deacylases actively preserve proteomic homochirality while allowing selective utilization of D-amino acids in specialized pathways. Overall, D-amino acids represent a crucial yet historically underappreciated dimension of biological chemistry, with implications ranging from microbial physiology to neuroscience and the origin of life.

Keywords: Enantiomers, amino acids' evolution, homochirality, biofilm, racemase, peptidoglycan.

Forma sugerida de citar: Díaz-Aguilar, J. F. y Hernández-Alva, M. I. (2026). Una mirada a los *D*-aminoácidos en los seres vivos. *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida.* Vol. 44(2):27-41. https://doi.org/10.17163/lgr.n44.2026.02.

Orcid IDs:

Josué Fabián Díaz Aguilar: https://orcid.org/0000-0003-0004-1577
Mario Israel Hernández Alva: https://orcid.org/0009-0004-8719-1109

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Introducción

Las proteínas constituyen una de las biomoléculas más abundantes en los seres vivos. El sistema proteico cumple funciones estructurales, catalíticas, de señalización, de almacenamiento y de defensa inmunológica (Sasabe y Suzuki, 2018). Todas las proteínas se componen de unidades básicas llamadas aminoácidos que se unen para formar cadenas llamadas péptidos que, al plegarse, adquieren una conformación tridimensional que puede ser la forma activa que conocemos como proteína. En la mayoría de los casos ocurre la asociación de varias cadenas polipeptídicas u oligomerización para alcanzar el estado plenamente activo.

Estos ladrillos de construcción conforman una lista de 20 α-aminoácidos, cuya estructura común se forma a partir de un carbono central (α) con cuatro sustituyentes: una amina, un carboxilo, un hidrógeno y una cadena lateral variable conocida como grupo R (Alberts y cols., 2015). En este carbono α se crea un centro quiral, excepto en la glicina, al haber dos posibles arreglos espaciales de los sustituyentes, lo que origina los isómeros ópticos *L*- (giro a la izquierda) y *D*- (giro a la derecha), llamados comúnmente enantiómeros. Las denominaciones *D*- o *L*- se asignan comparando la representación de Fischer de estas moléculas con la del gliceraldehído; si el grupo −OH ($-NH_3^+$ para aminoácidos) se halla a la derecha, es enantiómero *D* y si está a la izquierda, es *L*.

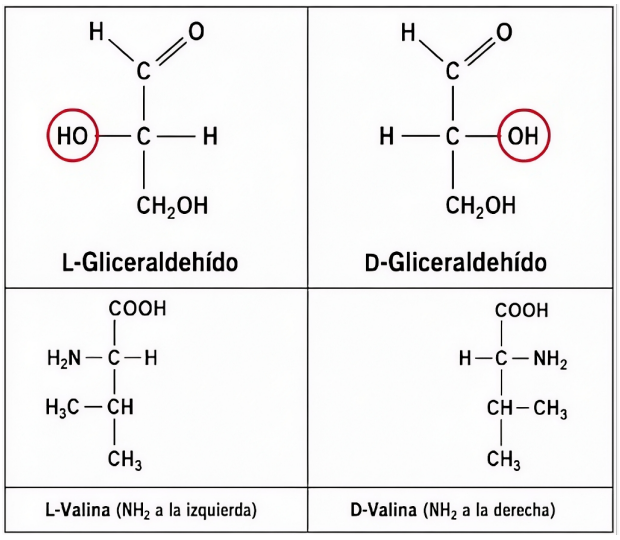


Figura 1. Designación *D/L* de moléculas quirales mediante proyecciones de Fischer. En el gliceraldehído (arriba), la configuración *L* se asigna cuando el grupo hidroxilo (−OH) unido al carbono quiral se localiza a la izquierda de la proyección, mientras que la configuración *D* corresponde a su ubicación a la derecha. Este criterio constituye la referencia histórica para la nomenclatura relativa *D/L* utilizada en carbohidratos y aminoácidos. Tomando como ejemplo la valina (abajo), la configuración *L* presenta el grupo amino ($-NH_2$) a la izquierda del α-carbono, mientras que en la configuración *D* dicho grupo se encuentra a la derecha. Cabe observar que los grupos −OH y $-NH_2$ presentan la misma orientación relativa en sus respectivas proyecciones de Fischer. De este modo, la designación *D/L* expresa una relación estructural con el gliceraldehído y no implica, necesariamente, el sentido de rotación óptica de la luz polarizada.

En las proteínas solo se utiliza uno de los enantiómeros: los *L*-aminoácidos; por ello, las proteínas se consideran un sistema homoquiral (Du y cols., 2023; Sasabe y Suzuki, 2018). Durante mucho tiempo se generalizó la idea de que la homoquiralidad se extendía a cualquier función que cumpliesen los aminoácidos dentro de los seres vivos, bajo el supuesto de que los *D*-aminoácidos carecían de relevancia biológica (Blackmond, 2010). Sin embargo, gracias al refinamiento de las técnicas analíticas, como la cromatografía enantioselectiva (Kobayashi, 2019), se logró detectar *D*-aminoácidos en cultivos bacterianos. Estos hallazgos demostraron que los *D*-aminoácidos están presentes en los seres vivos y

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

cumplen funciones fisiológicas independientes de las proteínas (Pollegioni y cols., 2025).

Desde su descubrimiento hasta la actualidad, los *D*-aminoácidos también se han detectado en eucariotas, desde levaduras hasta el sistema nervioso de los mamíferos (Fuchs y cols., 2005), lo que incrementa el número de funciones conocidas dentro de los organismos. Aunque gran parte de su metabolismo sigue siendo un misterio, su rol se continúa estudiando en múltiples niveles, lo que ha generado un gran interés en campos como la microbiología, la neurología, la endocrinología y la biotecnología (Du y cols., 2023).

D-aminoácidos en bacterias

Las primeras evidencias sólidas del papel biológico de los *D*-aminoácidos provienen del estudio de la pared celular bacteriana, una estructura compartida por todas las bacterias. Esta se encuentra compuesta por peptidoglicano, un complejo polimérico de enlaces glicosídicos entre *N*-acetilglucosamina y ácido *N*-acetilmurámico, unidos a aminoácidos, principalmente *D*-Ala y *D*-Glu (Cava y cols., 2011). Estos aminoácidos funcionan como puntos de anclaje para otras cadenas de peptidoglicano al formar pequeños péptidos entre los residuos de *D*-Ala; el entrecruzamiento de todas estas cadenas le brinda a la célula una estructura de gran rigidez (Figura 2). Gracias a los residuos de *D*-aminoácidos, la pared celular también protege a las bacterias contra proteasas y otras defensas inmunológicas, las cuales están incapacitadas para reconocer estos enantiómeros como sustrato, lo que convierte a estos aminoácidos en una diana de interés para el diseño de anticuerpos y antibióticos (Sanchez y cols., 2014).

El establecimiento de una colonia bacteriana suele conllevar el desarrollo de estructuras extracelulares compartidas denominadas *biofilms*. Estos están constituidos principalmente por fibras de proteínas amiloides y polisacáridos que brindan un hábitat de proliferación multicelular para bacterias como *Bacillus subtilis* (Kolodkin-Gal y cols., 2010), donde encuentran resguardo ante los sistemas inmunológicos del hospedero durante las infecciones. Los *D*-aminoácidos en el peptidoglicano también cumplen una función de anclaje al *biofilm*, lo que otorga protección mecánica ante el medio y permite la movilidad celular entre las fibras de la matriz (Su y cols., 2022).

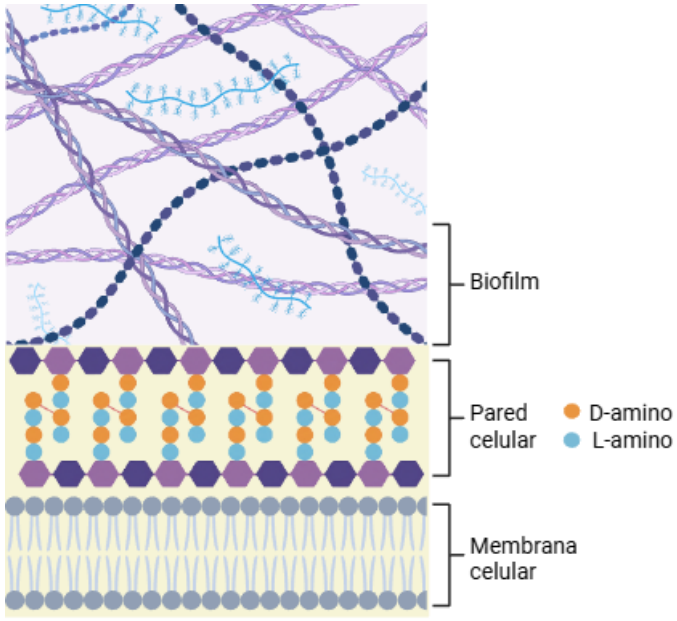


Figura 2. Estructura de la pared celular de peptidoglicano, cadenas de azúcares y péptidos de *D*-Ala y *D*-Glu. La inclusión de *D*-aminoácidos favorece la rigidez de la pared y la adhesión a estructuras extracelulares del *biofilm* como proteínas amiloides TasA (Sasabe y Suzuki, 2018).

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Además de su papel estructural, los *D*-aminoácidos cumplen funciones regulatorias dentro del *biofilm* (Roesch y cols., 2003), ya que promueven el rompimiento de quistes (fase de latencia) y aceleran la fase de proliferación. Aunque estas funciones regulatorias aún están siendo estudiadas, en pruebas contra *Staphylococcus aureus* y *Pseudomonas aeruginosa* se ha demostrado que el aumento en la concentración de aminoácidos en el medio, tales como *D*-Leu, *D*-Met, *D*-Trp o *D*-Tyr, promueve el desmantelamiento de las proteínas amiloides TasA, uno de los principales constituyentes del *biofilm* (Kolodkin-Gal y cols., 2010). La sustitución de los residuos de *D*-Ala en el peptidoglicano se ha estudiado ampliamente, y su reemplazo puede lograrse simplemente enriqueciendo el medio con otros *D*-aminoácidos. El efecto de dicho reemplazo conlleva la disminución o inhibición del anclaje de la pared de peptidoglicano a las proteínas TasA del *biofilm* (Ramón-Pérez y cols., 2014); los aminoácidos como *D*-Leu, *D*-Met, *D*-Trp y *D*-Tyr muestran tener la mayor capacidad contra la formación del *biofilm* bacteriano y se estudian como posibles tratamientos contra infecciones (Su y cols., 2022). Se ha comprobado que la adición de *D*-aminoácidos como *D*-Met y *D*-Trp puede aumentar la eficacia de tratamientos con antibióticos como la ciprofloxacina y la vancomicina, al facilitar la permeabilidad y el reconocimiento de la molécula (Cava y cols., 2011; Sanchez y cols., 2014).

Bacterias del ácido láctico y el metabolismo de D-aminoácidos

La principal fuente de *D*-aminoácidos de origen biológico proviene de su síntesis a través de racemasas (Radkov y Moe, 2014), una familia de enzimas cuya función es reconocer un *L*-aminoácido y transformarlo en su *D*-enantiómero; sin embargo, se ha demostrado que estas enzimas pueden catalizar la reacción contraria, llevando los *D*-aminoácidos hacia el *L*-enantiómero (Mutaguchi y cols., 2018). No son enzimas exclusivas de las bacterias, pues pueden encontrarse en varios grupos de animales (Fuchs y cols., 2005; Ollivaux y cols., 2014), pero sin duda las bacterias constituyen el grupo con el que mejor se han descrito las enzimas involucradas en el metabolismo de *D*-aminoácidos. La más estudiada de estas enzimas es la alanina racemasa (*AlaR*) (Kobayashi y cols., 2015; Rubinstein y Major, 2010), pues es la principal fuente de *D*-Ala para la pared de peptidoglicanos, aunque también se han identificado enzimas capaces de racemizar otros aminoácidos, como la aspartato racemasa (*AspR*) y la glutamato racemasa (*GluR*) (Glavas y Tanner, 1999).

Las bacterias del ácido láctico son un gran grupo de microorganismos fermentadores de azúcares con gran relevancia en la industria y como parte natural de la microbiota intestinal (Kobayashi, 2019; Sasabe y Suzuki, 2018). Se ha encontrado que este grupo de bacterias libera al medio altas cantidades de *D*-aminoácidos, principalmente *D*-Ala, pero también *D*-Leu, *D*-Val o *D*-Met (Mutaguchi y cols., 2016). Por su alta producción de aminoácidos racémicos durante los procesos de fermentación, las bacterias del ácido láctico han cobrado gran interés para la industria y su producción a gran escala (Kato y cols., 2011).

Estudios enzimáticos sobre la producción de *D*-aminoácidos en bacterias lácticas revelaron que varias de estas enzimas racemasas no son específicas para cierta cadena R, ya que algunas de ellas reconocen más de un tipo y sintetizan varios *D*-aminoácidos a partir de su contraparte *L*-. Por ejemplo, la isoleucina racemasa (*IsoR*), aislada de *Lactobacillus* sp. (Mutaguchi y cols., 2018), tiene poca especificidad para aminoácidos alifáticos, por lo que puede racemizar no solo *L*-Ile, sino también *L*-Leu, *L*-Val, *L*-Nva y *L*-Nle. Un caso similar es el de la lisina racemasa (*LysR*), aislada de la bacteria *Oenococcus oeni* (Kato y cols., 2012), la cual, además de catalizar la racemización hacia *D*-Lys, puede sintetizar *D*-Arg y *D*-Orn, otros aminoácidos con cargas positivas.

Las racemasas no son las únicas enzimas que sintetizan *D*-aminoácidos. Las *D*-aminoacil aminotransferasas (DAAT) son otra familia de enzimas que sintetizan *D*-aminoácidos al transferir un grupo amino a un azúcar (Kobayashi, 2019; Martinez-Carrion y Jenkins, 1965). El mecanismo de reacción comienza con el reconocimiento de un α-cetoácido; para la transaminación, el grupo carbonilo es sustituido por una amina. Aunque se considera que este grupo de enzimas posee cierta especificidad de sustrato a través del reconocimiento de los grupos R (Shilova y cols., 2023), se ha demostrado ampliamente que varias DAAT pueden catalizar la

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

transaminación hacia aminoácidos con diversos tipos de grupos R. Esto permite a las bacterias producir múltiples *D*-aminoácidos con una misma enzima, tales como *D*-Val, *D*-Leu, *D*-Nva y *D*-Met (Tanizawa y cols., 1989). Un caso más específico es el de la DAAT caracterizada en la bacteria hipertermófila *Thermotoga maritima*, la cual es capaz de catalizar la síntesis de *D*-Ala, *D*-Gln, *D*-Asp o *D*-Cys (Yu y cols., 2024), logrando así reconocer sustratos con cadenas R de naturalezas muy distintas.

Arqueas y D-aminoácidos

Es necesario mencionar el caso de las arqueas, el segundo gran dominio de procariontes y grupo del cual surgen los eucariontes (Stevens y Warnecke, 2023). Las arqueas son organismos unicelulares que presentan una pared celular menos densa que la de las bacterias, conocida como pseudopeptidoglicano. Su estructura también está constituida por una matriz de pequeños péptidos unidos a polisacáridos, pero casi ninguno de estos péptidos está formado por *D*-aminoácidos (Sasabe y Suzuki, 2018; Yu y cols., 2024). La inclusión de *D*-Ala y *D*-Glu puede ocurrir en el pseudopeptidoglicano; sin embargo, se considera que estas adiciones provienen de la disponibilidad de dichas moléculas en el medio. La detección de estos *D*-aminoácidos no es frecuente y se estima que proceden, en su mayoría, de comunidades microbianas externas, como las presentes en los lechos marinos (Imachi y cols., 2024).

Al ser tratadas como anomalías metabólicas, las enzimas relacionadas con los *D*-aminoácidos se consideran catabólicas. En este sentido, se han identificado algunas enzimas que reconocen *D*-aminoácidos, tales como la *AlaR* y una aminodeshidrogenasa con actividad hacia *D*-Ala y *D*-Pro como sustratos (Nagata y cols., 1999); se considera que estas enzimas cumplen funciones de eliminación de *D*-aminoácidos que pudieran acumularse al convivir con bacterias productoras de estos, como las bacterias lácticas. Dentro del metabolismo de las arqueas no se han encontrado mayores indicios de producción de enantiómeros *D*-. No obstante, recientemente se ha descrito una posible ruta de síntesis de α-cetoácidos, moléculas precursoras de azúcares que son utilizadas por las enzimas DAAT como precursoras de *D*-aminoácidos (Sasabe y Suzuki, 2018; Yu y cols., 2024).

D-aminoácidos dentro de eucariontes

Tras el descubrimiento de la *D*-Ala en bacterias, se fueron encontrando indicios de otros *D*-aminoácidos en multitud de de procesos biológicos dentro de los eucariotas. A mediados de la década de 1960 se detectaron *D*-aminoácidos en varios tipos de animales. Primero se aisló *D*-Ser en *Bombyx mori* (Srinivasan y cols., 1962), el gusano de seda, donde promueve la formación de la crisálida y la metamorfosis de la polilla. En las siguientes décadas se aislaron aminoácidos como *D*-Ala, *D*-Met y *D*-Glu en una gran diversidad de invertebrados marinos (Preston, 1985); asimismo, se hallaron *D*-Ala y *D*-Asp en tejidos musculares de moluscos como *Octopus vulgaris* (Abe y cols., 2005), y en etapas del desarrollo embrionario de equinodermos como *Paracentrotus lividus* (D'Aniello y cols., 1990).

La presencia de *D*-aminoácidos libres en la sangre de los organismos marinos cumple funciones amortiguadoras contra la presión osmótica del agua, ya que se ha demostrado que los grupos protonables de aminoácidos como la *D*-Ala pueden funcionar como un búfer fisiológico (D'Aniello y cols., 1990). Esta acción amortiguadora es regulada por enzimas *D*-aminoácido oxidantes (DAAO), las cuales catalizan la conversión de *D*-aminoácidos en α-cetoácidos (Yoshimura y cols., 2016), controlando de este modo la concentración de estas moléculas en los tejidos. Las DAAO muestran una gran especificidad hacia la *D*-Ala y, aunque también se conocen DAAO afines al *D*-Asp o a la *D*-Met, esta afinidad no parece ser exclusiva, por lo que pueden catabolizar otros *D*-aminoácidos en menor proporción (Preston, 1985).

Las plantas han demostrado incluir los *D*-aminoácidos dentro de múltiples sistemas fisiológicos y de desarrollo. En el grupo de las algas glaucófitas, relacionado con el origen del reino Plantae, se puede observar una fisiología con varios *D*-aminoácidos, entre los que se encuentran la *D*-Ala y el *D*-Glu (Palmer y cols., 2004). Inicialmente, la presencia de *D*-aminoácidos en las plantas se atribuía al microambiente del rizoma, donde la coexistencia con comunidades bacterianas enriquece el medio con estas moléculas, las cuales representan entre el 3 % y el 5 % del contenido total de aminoácidos (Pollegioni y cols., 2025).

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

El estudio de la fisiología de estas moléculas comenzó con su detección en la mayoría de los frutos, habiéndose aislado *D*-Ala, *D*-Arg, *D*-Asp y *D*-Glu (Pollegioni y cols., 2025), los cuales se relacionaron con el desarrollo de la semilla. A inicios de los años 90 se descubrió que la *D*-Met no estaba limitada a las raíces y que, de hecho, presentaba un transporte activo hacia otros tejidos vegetales, lo que sugiere una relación con funciones fisiológicas específicas (Du y cols., 2023). Se han identificado receptores de *D*-Asp y *D*-Ala que promueven la producción de etileno, una fitohormona responsable del desarrollo de la radícula durante la germinación y el crecimiento de la raíz (Du y cols., 2023; Kolukisaoglu, 2020). Por último, la producción de peptidoglicanos en la pared de los cloroplastos ha sido descrita como un carácter ancestral compartido entre las cianobacterias y los cloroplastos de las angiospermas, que respalda la teoría endosimbiótica de este organelo (Tran y cols., 2023).

En el reino de los hongos no suele ser común la síntesis de *D*-aminoácidos. Un caso particular es el de las levaduras que, al convivir en el medio con bacterias fermentadoras lácticas, han desarrollado metabolismos que aprovechan la abundancia de estas moléculas en el entorno (Kato y cols., 2011; Mutaguchi y cols., 2016). En *Saccharomyces cerevisiae* se han descrito complejos enzimáticos de aminoácido deshidratasa (AmDH); estas enzimas son liasas que transforman ciertos aminoácidos, como la *D*-Thr y la *D*-Ser, en azúcares (Gogami y cols., 2011). Una de estas enzimas es la serina deshidratasa (*SerDH*), la cual puede reconocer como sustrato tanto la *D*-Ser como la *L*-Ser para convertirlas en triosas, con una tendencia preferencial por la *D*-Ser (Ito y cols., 2008).

Esta afinidad apunta a una adaptación ecológica: como se ha explicado anteriormente, los medios fermentadores suelen presentar niveles altos de *D*-aminoácidos debido a las bacterias fermentadoras lácticas. En un nicho donde conviven ambos microorganismos, las levaduras —al igual que algunas arqueas— pueden aprovechar los *D*-aminoácidos como sustrato para la producción de piruvato y oxaloacetato, los cuales pueden incorporarse al ciclo de Krebs (Mutaguchi y cols., 2016) (Figura 3).

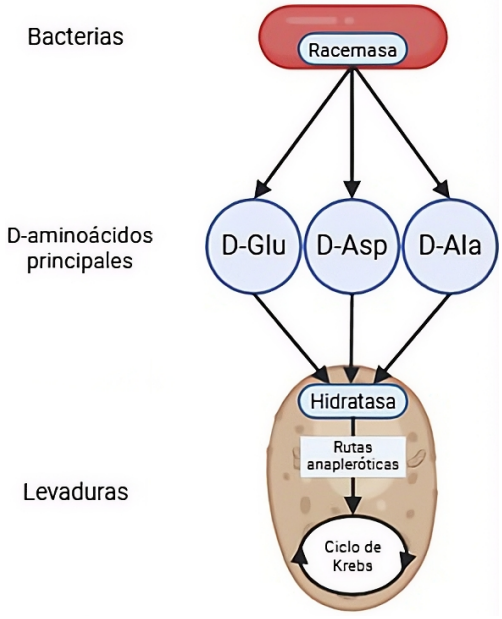


Figura 3. Anabolismo de *D*-aminoácidos por enzimas racemasas (AAr) en bacterias lácticas. Liberados al medio como reguladores de la formación del *biofilm*. Catabolismo de *D*-aminoácidos por levaduras para la síntesis de metabolitos del ciclo de Krebs (rutas anapleróticas) (Mutaguchi y cols., 2016).

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Sistema nervioso de los mamíferos y D-aminoácidos

Los *D*-aminoácidos se han encontrado en los sistemas nervioso y endocrino de los mamíferos. Estos animales cuentan con sistemas nerviosos de alta complejidad, de los cuales se han aislado aminoácidos como la *D*-serina y el *D*-Asp (Fuchs y cols., 2005), además de haberse descrito complejos enzimáticos específicos para su metabolismo (Sasabe y Suzuki, 2018). Se ha demostrado que la *D*-serina actúa como promotora en el proceso sináptico, así como en la formación de dendritas. La deficiencia en la producción de esta molécula se ha relacionado con la disminución de habilidades cognitivas, asociándose con enfermedades como el Alzheimer (Li-Zhen y Xing-Zu, 2003; Ni y cols., 2023). La producción de este aminoácido se encuentra muy centralizada en el cerebro, principalmente en los astrocitos; estas células contienen complejos enzimáticos integrados por la serina racemasa (*SerR*) y la *SerDH* (Suzuki y cols., 2015), lo que permite controlar los niveles locales de *D*-serina y producir energía en el proceso.

Este aminoácido posee una función central en el desarrollo de habilidades motoras y espaciales; durante el desarrollo embrionario del cerebelo se ha registrado una alta concentración de este, la cual disminuye a niveles mínimos en la etapa adulta (Nagata y cols., 1994). El control de los niveles de *D*-serina está mediado por enzimas *D*-aminoácido oxidasas (DAAO), que presentan una baja expresión en el nacimiento y en el desarrollo postnatal, pero aumentan su actividad hacia la adultez, manteniendo así los niveles de *D*-serina al mínimo. Se ha descrito que la actividad de las DAAO se concentra en la base del cerebelo y en la médula espinal, lo que restringe la producción de *D*-serina de manera regionalizada hacia el sistema nervioso central (Sasabe y cols., 2014).

El *D*-Asp es otro aminoácido hallado ampliamente en el sistema nervioso de los mamíferos, al cual se le han atribuido diversas funciones endocrinas, especialmente durante la diferenciación celular (Furuchi y Homma, 2005). Su presencia en el tejido glandular estimula la producción de testosterona en los testículos, así como de oxitocina, vasopresina y prolactina en la glándula pituitaria (Wang y cols., 2000). Al igual que ocurre con la *D*-serina, el *D*-Asp se asocia con la plasticidad neuronal, exhibiendo picos de actividad durante el desarrollo embrionario que decaen tras el nacimiento; asimismo, su inclusión en la dieta ha mostrado beneficios para la plasticidad neuronal (Errico y cols., 2011). Este aminoácido también ha sido introducido en la industria cosmética como un aditivo antienvejecimiento, ya que su adsorción en la piel se ha relacionado con un efecto antioxidante para el colágeno en las células de la dermis (Mutaguchi y cols., 2016).

Como en el caso de la *D*-serina, su producción se asocia a la enzima aspartato racemasa (*AspR*), la cual es capaz de catalizar la reacción de racemización en ambas direcciones (de *L*- a *D*- y de *D*- a *L*-) (Matsuda y cols., 2015); sin embargo, la producción de *D*-Asp no puede atribuirse exclusivamente a esta enzima. Trabajos de mutagénesis dirigida han logrado la inactivación de la enzima *AspR*, lo que disminuye los niveles de *D*-Asp en ratones, pero no los inhibe por completo (Kobayashi, 2019), demostrando de este modo la existencia de otras vías de síntesis. La explicación de estas vías alternativas se halló en la baja especificidad de algunas racemasas como la *SerR*, cuya actividad ha demostrado sintetizar también *D*-Asp a partir del enantiómero *L*- (Ito y cols., 2016).

En el sistema nervioso existen varias enzimas enantioselectivas para *D*-aminoácidos. Al igual que la *SerR*, muchas de estas pueden reconocer múltiples *D*-aminoácidos; otro ejemplo de ello son los receptores ionotrópicos para *L*-Glu (NMDAR), los cuales han mostrado afinidad por la *D*-serina, el *D*-Asp y la *Gly* (Mothet y cols., 2000), por lo que resulta necesario mantener regulados los niveles de *D*-aminoácidos. La activación desmedida de los receptores NMDAR o la inactivación de las enzimas DAAO conlleva la acumulación de *D*-aminoácidos, lo que puede provocar citotoxicidad y, en el cerebro, desencadenar afecciones como la esquizofrenia (Sasabe y cols., 2007).

Proteínas homoquirales en un sistema heteroquiral

En ausencia de fuentes de asimetría, los productos de una reacción química abiótica generan una mezcla racémica, de modo que las moléculas quirales, como los aminoácidos, se producen en canti-

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

dades equivalentes. Esto no ocurre en los sistemas proteicos debido al trabajo activo de las propias enzimas, las cuales sintetizan, reconocen y están conformadas por *L*-aminoácidos, por lo que se puede considerar que la exclusividad en el uso de *L*-aminoácidos en las proteínas es producto de un equilibrio dinámico (Du y cols., 2023).

Como se ha desglosado a lo largo del texto, la presencia de *D*-aminoácidos en los seres vivos está estrictamente regulada por enzimas como racemasas, *D*-aminoácido aminotransferasas, *D*-aminoácido oxidasas y *D*-aminoácido deshidratasas (Molla y cols., 2020; Ollivaux y cols., 2014). Debido a estas regulaciones, no es común encontrar *D*-aminoácidos en las proteínas; su aparición se asocia a modificaciones postraduccionales que ocurren en la cadena polipeptídica, ya que en muy raras ocasiones son unidos por el ribosoma durante el proceso de elongación (Alberts y cols., 2015). Los aminoácidos llegan al ribosoma cargados en un *tRNA*, molécula que reconoce la secuencia de bases que determina la identidad de cada residuo.

Para prevenir la inserción de *D*-aminoácidos en los *tRNAs*, existen dos mecanismos de regulación o puntos de control (*checkpoints*) de quiralidad (Kuncha y cols., 2019). El primero es la estereoselectividad de las aminoacil-*tRNA* sintetasas (*aaRS*), enzimas encargadas de unir los aminoácidos con su respectivo *tRNA* que poseen una preferencia quiral hacia los *L*-aminoácidos, pero cuyo reconocimiento puede fallar y unir, en algunos casos, los enantiómeros *D* (Prathapan, 2025). De estos errores se ocupa el segundo punto de control: las enzimas *D*-aminoacil-*tRNA* desacetilasas (*DTD*) (Bhatt y cols., 2016; Jani y Pappachan, 2022). La función de estas es reconocer la quiralidad de los aminoácidos cargados en los *tRNA* e hidrolizar la unión de los *D*-aminoácidos si llegan a estar enlazados erróneamente, purgando así los fallos de carga.

Dado que la función de la *DTD* es enantioselectiva, solo actúa sobre *D*-aminoácidos; sin embargo, se ha comprobado que este reconocimiento presenta un sesgo en el caso particular de la glicina, un aminoácido aquiral (Calendar, 2017). Al no ser una molécula quiral, la *DTD* puede reconocer como sustrato al *tRNAspy* e hidrolizar su unión a pesar de tener cargado el aminoácido correcto. Existe evidencia de que este sesgo es corregido por el factor de elongación *EF-Tu*, el cual forma un complejo con el *tRNA* que protege a la glicina de ser reconocida e hidrolizada por la *DTD* (Kuncha y cols., 2019).

Evolución hacia la homoquiralidad

La vida está ligada al planeta Tierra; su origen y evolución modificaron la corteza terrestre a un nivel tan profundo que este planeta no puede explicarse sin la intervención de la biosfera (Cintas, 2013). La acción biológica es la razón por la cual los *D*-aminoácidos son escasos en la naturaleza, ya que la actividad enzimática recicla estas moléculas en otros metabolitos. Sin embargo, en la Tierra primitiva no existían tales barreras enzimáticas. Durante los primeros millones de años, la formación de moléculas orgánicas en un sistema abiótico producía mezclas racémicas de *D*-/*L*-aminoácidos, por lo que ambos enantiómeros habrían estado disponibles durante los procesos de evolución química.

Se han sugerido dos posibles mecanismos abióticos para la selección de uno de los enantiómeros de manera previa a la evolución de la vida en la Tierra: por un lado, las hipótesis deterministas, que atribuyen la preferencia quiral a sesgos físicos y químicos análogos entre el universo y los sistemas geoquímicos terrestres; por otro, las hipótesis estocásticas, que suponen una ruptura de simetría originada por fluctuaciones o contingencias locales, cuya relación se amplifica posteriormente hasta alcanzar diferencias enantioméricas significativas (Malloy y cols., 2025).

Dentro del enfoque determinista, la violación de la paridad en la interacción electrodébil predice diferencias minúsculas de energía entre enantiómeros, lo que sugiere un sesgo sistemático a favor de los *L*-aminoácidos y los *D*-azúcares (Malloy y cols., 2025). Estas diferencias son demasiado pequeñas para explicar por sí solas la homoquiralidad, pero podrían haberse visto reforzadas en entornos donde los centros metálicos pesados generan complejos de geometría quiral capaces de discriminar entre las formas *L* y *D* durante la formación abiótica de péptidos. Un ejemplo de este mecanismo se observa en el Cu(II) y en el complejo evolucionador de oxígeno (OEC), donde las estructuras de cobre intrínsecamente quirales promueven la polarización del espín durante la transferencia electrónica en la producción de hidrógeno, beneficiándose así

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

de la quiralidad del material (Cintas, 2013; Garcés-Pineda y cols., 2025).

En este sentido, el mecanismo de formación de péptidos inducido por sales (SIPF), propuesto como una vía general de condensación de aminoácidos en océanos primitivos ricos en NaCl y Cu(II), no solo supera las barreras termodinámicas y cinéticas de la peptidización en medio acuoso, sino que ofrece un escenario en el que la estructura de los complejos metálicos podría favorecer ligeramente la incorporación de *L*-aminoácidos, proporcionando una pista concreta sobre el origen de la biohomoquiralidad (Cintas, 2013).

Otra vertiente determinista traslada el problema al espacio interestelar y al bombardeo meteórico temprano. Se ha documentado la síntesis de aminoácidos en hielos interestelares análogos expuestos a radiación ultravioleta, así como su presencia en cometas y meteoritos. En casos como el del meteorito de *Murchison*, se han encontrado mezclas de decenas de aminoácidos con pequeños excesos enantioméricos, lo que apunta a una posible fuente extraterrestre de asimetría molecular (Jakschitz y Rode, 2012). Estos desequilibrios podrían deberse a la radiación circularmente polarizada en regiones de formación estelar, capaz de inducir asimetrías fotoquímicas sobre mezclas previamente racémicas, de manera que la Tierra primitiva habría heredado un ligero sesgo quiral en el material orgánico aportado desde el espacio (Jakschitz y Rode, 2012).

En contraste, las hipótesis estocásticas insisten en que el universo no "prefiere" de manera absoluta una configuración concreta, y que la elección *L*/*D* habría sido, en algún punto, un accidente histórico (Malloy y cols., 2025). La llamada hipótesis del azar (*chance hypothesis*) imagina un escenario en el que, en un microentorno particular, una ligera descompensación entre enantiómeros —producto de fluctuaciones, nucleación azarosa de cristales o resolución espontánea— quedó fijada debido a que ese conjunto específico de moléculas participó en los primeros ciclos de autoorganización y replicación química (Malloy y cols., 2025).

Ahora bien, sin un mecanismo de amplificación, tales fluctuaciones tenderían a promediar de nuevo hacia el estado racémico. Aquí cobran relevancia los modelos de autocatálisis con antagonismo mutuo propuestos por Frank (1953) y desarrollados en detalle en la literatura reciente: en ellos, cada enantiómero cataliza su propia formación y, a la vez, reacciona con su imagen especular para generar un producto inactivo, de modo que cualquier mínimo exceso inicial puede crecer hasta conducir a una población casi enantiopura. La reacción de Soai (Soai y cols., 1995), una alquilación autocatalítica que amplifica excesos enantioméricos diminutos hasta valores cercanos a la pureza óptica, se ha erigido en el paradigma experimental de este tipo de comportamiento (Jakschitz y Rode, 2012; Hanopolskyi y cols., 2021).

En el plano físico, los procesos de cristalización y el comportamiento de fase proporcionan rutas alternativas de ruptura y amplificación de simetría. En sistemas que cristalizan como conglomerados, la combinación de disolución, recristalización y atrición mecánica puede llevar a la desaparición completa de uno de los enantiómeros en el sólido; por su parte, en sistemas que forman cristales racémicos, los modelos eutécticos muestran que la coexistencia de sólido racémico y enantiomorfo puro fija excesos enantioméricos muy elevados en solución (Malloy y cols., 2025). Los experimentos con aminoácidos y modelos de copolimerización muestran, además, que estas dinámicas pueden conjugarse con procesos de autoensamblaje en superficies para generar distribuciones de oligómeros altamente no aleatorias a partir de mezclas racémicas, proporcionando un puente entre la química de fases y la emergencia de estructuras peptídicas homoquirales.

Sobre este trasfondo físico-químico se superponen, finalmente, los mecanismos de fijación biológica. La biosíntesis proteica moderna exhibe una selectividad quiral extrema: la maquinaria constituida por las aminoacil-*tRNA* sintetasas y el centro peptidil-transferasa del ribosoma discrimina de manera muy eficiente contra los *D*-aminoácidos, hasta el punto de que resulta prácticamente imposible incorporarlos en las proteínas mediante las rutas naturales de síntesis (Jakschitz y Rode, 2012). Ello sugiere que, una vez alcanzado un cierto grado de enriquecimiento en *L*-aminoácidos y *D*-azúcares por la combinación de mecanismos deterministas y estocásticos, la evolución fijó esta elección al integrar la quiralidad en el núcleo mismo de la traducción y la replicación (Blackmond, 2010). Así, las teorías sobre el surgimiento de la homoquiralidad conver-

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

gen en una imagen donde las pequeñas asimetrías iniciales —ya sean dictadas por leyes físicas, por accidentes de la estadística o por la propia dinámica de redes— fueron amplificadas y canalizadas por sistemas químicos cada vez más complejos, hasta quedar codificadas en la maquinaria molecular de la vida tal como la conocemos hoy.

Conclusiones

La afirmación de que los seres vivos constituyen un sistema homoquiral no es exacta; la homoquiralidad de los aminoácidos es una condición que se cumple para las proteínas, mas no representa una regla absoluta para los organismos. Como se ha destacado a lo largo de este trabajo, los *D*-aminoácidos en los seres vivos desempeñan múltiples funciones, entre las que sobresalen las de tipo hormonal, las cuales aportan una gran especificidad dentro de estos sistemas debido a la estereoselectividad de dichas moléculas. La condición homoquiral de las proteínas y el uso de enantiómeros *D*- en otros sistemas están fuertemente regulados por las propias proteínas, las cuales ejercen activamente un rol de sesgo estereoselectivo; de este modo, dirigen el uso de *L*-aminoácidos como base para la síntesis proteica y el de los *D*-aminoácidos como moléculas de señalización.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido posible gracias al impulso del Dr. Alejandro Heredia Barbero y del Instituto de Ciencias Nucleares de la UNAM. Agradecemos el acceso a la información durante la investigación a la Unidad de Información y Biblioteca Marcos Rosenbaum. Destacamos la labor de la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (Secihti) por el proyecto CF-2023-I-2604, al proyecto DGAPA-PAPIIT IN21425 y al Posgrado en Ciencias Biológicas de la UNAM por permitir nuestro desarrollo académico.

Declaración de uso de inteligencia artificial

Los autores DECLARAN que, durante la preparación del artículo titulado «Una mirada a los *D*-aminoácidos en los seres vivos», no se utilizaron herramientas de inteligencia artificial generativa ni sistemas automatizados de asistencia para la redacción, análisis, interpretación de datos, generación de contenido, traducción o edición del manuscrito.

Los autores asumen plena responsabilidad por el contenido, la originalidad, la integridad y la versión final del artículo.

Contribución de los autores

J.F.D.A.: Conceptualización, investigación, administración de proyecto, recursos, supervisión, visualización, escritura de borrador, revisión y edición. **M.I.H.A.:** Conceptualización, investigación, recursos, software, visualización, escritura de borrador, revisión y edición.

Referencias

Abe, H., Yoshikawa, N., Sarower, M. G., y Okada, S. (2005). Physiological function and metabolism of free D-alanine in aquatic animals. *Biological and Pharmaceutical Bulletin*, *28*(9), 1571–1577. Online: https://doi.org/10.1248/bpb.28.1571

Alberts, B., Johnson, A., Lewis, J., Morgan, D., Raff, M., Roberts, K., y Walter, P. (2015). *Molecular biology of the cell* (6ta ed.). Reino Unido: Garland Science Taylor & Francis Group.

Bhatt, T. K., Soni, R., y Sharma, D. (2016). Recent updates on D-tyr-trna^{Tyr} deacylase (dtd): An enzyme essential for fidelity and quality of protein synthesis. *Frontiers in Cell and Developmental Biology*, *4*, 3. Online: https://doi.org/10.3389/fcell.2016.00032

Blackmond, D. G. (2010). The origin of biological homochirality. *Cold Spring Harbor Perspectives in Biology*, *2*(5), a002147. Online: https://doi.org/10.1101/cshperspect.a002147

Calendar, R. (2017). D-tyrosyl-trna deacylase: A new function. *Trends in Biochemical Sciences*, *42*(9), 684–686. Online: https://doi.org/10.1016/j.tibs.2017.06.012

Cava, F., Lam, H., De Pedro, M. A., y Waldor, M. K. (2011). Emerging knowledge of regulatory roles

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

of D-amino acids in bacteria. *Cellular and Molecular Life Sciences*, *68*(5), 817–831. Online: https://doi.org/10.1007/s00018-010-0571-8

Cintas, P. (Ed.). (2013). *Biochirality: Origins, evolution and molecular recognition*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. Online: https://doi.org/10.1007/978-3-642-37626-9

D'Aniello, A., Nardi, G., Cipollaro, M., Pischetola, M., y Padula, L. (1990). Occurrence of D-alanine in the eggs and the developing embryo of the sea urchin *Paracentrotus lividus*. *Comparative Biochemistry and Physiology Part B: Comparative Biochemistry*, *97*(2), 291–294. Online: https://doi.org/10.1016/0305-0491(90)90283-Y

Du, S., Wey, M., y Armstrong, D. W. (2023). D-amino acids in biological systems. *Chirality*, *35*(7), 508–534. Online: https://doi.org/10.1002/chir.23562

Errico, F., Nisticò, R., Napolitano, F., Mazzola, C., Astone, D., Pisapia, T., … Usiello, A. (2011). Increased D-aspartate brain content rescues hippocampal age-related synaptic plasticity deterioration of mice. *Neurobiology of Aging*, *32*(12), 2229–2243. Online: https://doi.org/10.1016/j.neurobiolaging.2010.01.002

Frank, F. C. (1953). On spontaneous asymmetric synthesis. *Biochimica et Biophysica Acta*, *11*, 459–463. Online: https://doi.org/10.1016/0006-3002(53)90082-1

Fuchs, S. A., Berger, R., Klomp, L. W. J., y De Koning, T. J. (2005). D-amino acids in the central nervous system in health and disease. *Molecular Genetics and Metabolism*, *85*(3), 168–180. Online: https://doi.org/10.1016/j.ymgme.2005.03.003

Furuchi, T., y Homma, H. (2005). Free D-aspartate in mammals. *Biological and Pharmaceutical Bulletin*, *28*(9), 1566–1570. Online: https://doi.org/10.1248/bpb.28.1566

Garcés-Pineda, F. A., Yu, J., Mesa, C. A., Plana-Ruiz, S., Ruano, D., Liang, Y., … Galán-Mascarós, J. R. (2025). Operando evidence on the chirality-enhanced oxygen evolution reaction in intrinsically chiral electrocatalysts. *Chemical Science*, *16*(14), 5475–5482. Online: https://doi.org/10.1039/D4SC07927B

Glavas, S., y Tanner, M. E. (1999). Catalytic acid/base residues of glutamate racemase. *Biochemistry*, *38*(13), 4106–4113. Online: https://doi.org/10.1021/bi982663n

Gogami, Y., Okada, K., y Oikawa, T. (2011). High-performance liquid chromatography analysis of naturally occurring D-amino acids in sake. *Journal of Chromatography B*, *879*(30), 3259–3267. Online: https://doi.org/10.1016/j.jchromb.2011.04.006

Hanopolskyi, A. I., Smaliak, V. A., Novichkov, A. I., y Semenov, S. N. (2021). Autocatalysis: Kinetics, mechanisms and design. *ChemSystemsChem*, *3*(4), e2000026. Online: https://doi.org/10.1002/syst.202000026

Imachi, H., Nobu, M. K., Kato, S., Takaki, Y., Miyazaki, M., Miyata, M., … Takai, K. (2024). *Promethearchaeum syntrophicum* gen. nov., sp. nov., an anaerobic, obligately syntrophic archaeon, the first isolate of the lineage 'asgard' archaea, and proposal of the new archaeal phylum promethearchaeota phyl. nov. and kingdom promethearchaeati regn. nov. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, *74*(1). Online: https://doi.org/10.1099/ijsem.0.006435

Ito, T., Hayashida, M., Kobayashi, S., Muto, N., Hayashi, A., Yoshimura, T., y Mori, H. (2016). Serine racemase is involved in D-aspartate biosynthesis. *Journal of Biochemistry (Tokyo)*, *160*(6), 345–353. Online: https://doi.org/10.1093/jb/mvw043

Ito, T., Hemmi, H., Kataoka, K., Mukai, Y., y Yoshimura, T. (2008). A novel zinc-dependent D-serine dehydratase from *Saccharomyces cerevisiae*. *Biochemical Journal*, *409*(2), 399–406. Online: https://doi.org/10.1042/BJ20070642

Jakschitz, T. A. E., y Rode, B. M. (2012). Chemical evolution from simple inorganic compounds to chiral peptides. *Chemical Society Reviews*, *41*(16), 5484–5507. Online: https://doi.org/10.1039/c2cs35073d

Jani, J., y Pappachan, A. (2022). A review on quality control agents of protein translation – the role of trans-editing proteins. *International Journal of Biological Macromolecules*, *199*, 252–263. Online: https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.12.176

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Kato, S., Hemmi, H., y Yoshimura, T. (2012). Lysine racemase from a lactic acid bacterium, *Oenococcus oeni*: structural basis of substrate specificity. *Journal of Biochemistry (Tokyo)*, *152*(6), 505–508. Online: https://doi.org/10.1093/jb/mvs120

Kato, S., Ishihara, T., Hemmi, H., Kobayashi, H., y Yoshimura, T. (2011). Alterations in D-amino acid concentrations and microbial community structures during the fermentation of red and white wines. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, *111*(1), 104–108. Online: https://doi.org/10.1016/j.jbiosc.2010.08.019

Kobayashi, J. (2019). D-amino acids and lactic acid bacteria. *Microorganisms*, *7*(12), 690. Online: https://doi.org/10.3390/microorganisms7120690

Kobayashi, J., Yukimoto, J., Shimizu, Y., Ohmori, T., Suzuki, H., Doi, K., y Ohshima, T. (2015). Characterization of *Lactobacillus salivarius* alanine racemase: short-chain carboxylate-activation and the role of a131. *SpringerPlus*, *4*, 639. Online: https://doi.org/10.1186/s40064-015-1335-6

Kolodkin-Gal, I., Romero, D., Cao, S., Clardy, J., Kolter, R., y Losick, R. (2010). D-amino acids trigger biofilm disassembly. *Science*, *328*(5978), 627–629. Online: https://doi.org/10.1126/science.1188628

Kolukisaoglu, Ü. (2020). D-amino acids in plants: Sources, metabolism, and functions. *International Journal of Molecular Sciences*, *21*(15), 5421. Online: https://doi.org/10.3390/ijms21155421

Kuncha, S. K., Kruparani, S. P., y Sankaranarayanan, R. (2019). Chiral checkpoints during protein biosynthesis. *Journal of Biological Chemistry*, *294*(45), 16535–16548. Online: https://doi.org/10.1074/jbc.REV119.008166

Li-Zhen, W., y Xing-Zu, Z. (2003). Spatiotemporal relationships among D-serine, serine racemase, and D-amino acid oxidase during mouse postnatal development. *Acta Pharmacologica Sinica*, *24*(10), 965–974.

Malloy, J. F., Millsaps, C., Narasimhan, K., Slocombe, L., Mathis, C., Cronin, L., y Walker, S. I. (2025). *The emergence of chirality from metabolism.* Online: https://doi.org/10.48550/arXiv.2505.01056 (arXiv preprint arXiv:2505.01056)

Martinez-Carrion, M., y Jenkins, W. T. (1965). D-alanine-D-glutamate transaminase. *Journal of Biological Chemistry*, *240*(9), 3538–3546. Online: https://doi.org/10.1016/S0021-9258(18)97177-2

Matsuda, S., Katane, M., Maeda, K., Kaneko, Y., Saitoh, Y., Miyamoto, T., … Homma, H. (2015). Biosynthesis of D-aspartate in mammals: the rat and human homologs of mouse aspartate racemase are not responsible for the biosynthesis of D-aspartate. *Amino Acids*, *47*(5), 975–985. Online: https://doi.org/10.1007/s00726-015-1926-0

Molla, G., Chaves-Sanjuan, A., Savinelli, A., Nardini, M., y Pollegioni, L. (2020). Structure and kinetic properties of human D-aspartate oxidase, the enzyme-controlling D-aspartate levels in brain. *FASEB Journal*, *34*(1), 1182–1197. Online: https://doi.org/10.1096/fj.201901703R

Mothet, J.-P., Parent, A. T., Wolosker, H., Brady, R. O., Linden, D. J., Ferris, C. D., … Snyder, S. H. (2000). D-serine is an endogenous ligand for the glycine site of the *N*-methyl-D-aspartate receptor. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *97*(9), 4926–4931. Online: https://doi.org/10.1073/pnas.97.9.4926

Mutaguchi, Y., Kasuga, K., y Kojima, I. (2018). Production of D-branched-chain amino acids by lactic acid bacteria carrying homologs to isoleucine 2-epimerase of *Lactobacillus buchneri*. *Frontiers in Microbiology*, *9*, 1540. Online: https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.01540

Mutaguchi, Y., Kobayashi, J., Oikawa, T., y Ohshima, T. (2016). D-amino acids in fermentative foods. En T. Yoshimura, T. Nishikawa, y H. Homma (Eds.), *D-amino acids* (pp. 341–357). Tokyo: Springer Japan. Online: https://doi.org/10.1007/978-4-431-56077-7_22

Nagata, Y., Horiike, K., y Maeda, T. (1994). Distribution of free D-serine in vertebrate brains. *Brain Research*, *634*(2), 291–295. Online: https://doi.org/10.1016/0006-8993(94)91932-1

Nagata, Y., Tanaka, K., Iida, T., Kera, Y., Yamada, R., Nakajima, Y., … Kawaguchi-Nagata, K. (1999). Occurrence of D-amino acids in a few archaea and dehydrogenase activities in hyperthermophile *Pyrobaculum islandicum*. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Protein Structure and Molecular*

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Enzymology, *1435*(1–2), 160–166. Online: https://doi.org/10.1016/S0167-4838(99)00208-3

Ni, X., Inoue, R., Wu, Y., Yoshida, T., Yaku, K., Nakagawa, T., … Mori, H. (2023). Regional contributions of D-serine to alzheimer's disease pathology in male app$^{NL–G–F/NL–G–F}$ mice. *Frontiers in Aging Neuroscience*, *15*, 1211067. Online: https://doi.org/10.3389/fnagi.2023.1211067

Ollivaux, C., Soyez, D., y Toullec, J. (2014). Biogenesis of D-amino acid containing peptides/proteins: where, when and how? *Journal of Peptide Science*, *20*(8), 595–612. Online: https://doi.org/10.1002/psc.2637

Palmer, J. D., Soltis, D. E., y Chase, M. W. (2004). The plant tree of life: an overview and some points of view. *American Journal of Botany*, *91*(10), 1437–1445. Online: https://doi.org/10.3732/ajb.91.10.1437

Pollegioni, L., Kustrimovic, N., Piubelli, L., Rosini, E., Rabattoni, V., y Sacchi, S. (2025). D-amino acids: new functional insights. *The FEBS Journal*, *292*(18), 4395–4417. Online: https://doi.org/10.1111/febs.70083

Prathapan, P. (2025). Aminoacyl-trna synthetase: A 'semiotic enzyme'. *European Journal of Medical Genetics*, *77*, 105041. Online: https://doi.org/10.1016/j.ejmg.2025.105041

Preston, R. L. (1985). Distribution and transport of D-amino acids in marine invertebrates. *MDI Biological Laboratory Bulletin*, *25*, 1–3.

Radkov, A. D., y Moe, L. A. (2014). Bacterial synthesis of D-amino acids. *Applied Microbiology and Biotechnology*, *98*(12), 5363–5374. Online: https://doi.org/10.1007/s00253-014-5726-3

Ramón-Pérez, M. L., Diaz-Cedillo, F., Ibarra, J. A., Torales-Cardeña, A., Rodríguez-Martínez, S., Jan-Roblero, J., … Cancino-Diaz, J. C. (2014). D-amino acids inhibit biofilm formation in *Staphylococcus epidermidis* strains from ocular infections. *Journal of Medical Microbiology*, *63*(10), 1369–1376. Online: https://doi.org/10.1099/jmm.0.075796-0

Roesch, P. L., Redford, P., Batchelet, S., Moritz, R. L., Pellet, S., Haugen, B. J., … Welch, R. A. (2003). Uropathogenic *Escherichia coli* use D-serine deaminase to modulate infection of the murine urinary tract. *Molecular Microbiology*, *49*(1), 55–67. Online: https://doi.org/10.1046/j.1365-2958.2003.03543.x

Rubinstein, A., y Major, D. T. (2010). Understanding catalytic specificity in alanine racemase from quantum mechanical and molecular mechanical simulations of the arginine 219 mutant. *Biochemistry*, *49*(18), 3957–3964. Online: https://doi.org/10.1021/bi1002629

Sanchez, C. J., Akers, K. S., Romano, D. R., Woodbury, R. L., Hardy, S. K., Murray, C. K., y Wenke, J. C. (2014). D-amino acids enhance the activity of antimicrobials against biofilms of clinical wound isolates of *Staphylococcus aureus* and *Pseudomonas aeruginosa*. *Antimicrobial Agents and Chemotherapy*, *58*(8), 4353–4361. Online: https://doi.org/10.1128/AAC.02468-14

Sasabe, J., Chiba, T., Yamada, M., Okamoto, K., Nishimoto, I., Matsuoka, M., y Aiso, S. (2007). D-serine is a key determinant of glutamate toxicity in amyotrophic lateral sclerosis. *The EMBO Journal*, *26*(18), 4149–4159. Online: https://doi.org/10.1038/sj.emboj.7601840

Sasabe, J., y Suzuki, M. (2018). Distinctive roles of D-amino acids in the homochiral world: Chirality of amino acids modulates mammalian physiology and pathology. *The Keio Journal of Medicine*, *68*(1), 1–16. Online: https://doi.org/10.2302/kjm.2018-0001-IR

Sasabe, J., Suzuki, M., Imanishi, N., y Aiso, S. (2014). Activity of D-amino acid oxidase is widespread in the human central nervous system. *Frontiers in Synaptic Neuroscience*, *6*, 14. Online: https://doi.org/10.3389/fnsyn.2014.00014

Shilova, S. A., Khrenova, M. G., Matyuta, I. O., Nikolaeva, A. Y., Rakitina, T. V., Klyachko, N. L., … Bezsudnova, E. Y. (2023). To the understanding of catalysis by D-amino acid transaminases: A case study of the enzyme from *Aminobacterium colombiense*. *Molecules*, *28*(5), 2109. Online: https://doi.org/10.3390/molecules28052109

Soai, K., Shibata, T., Morioka, H., y Choji, K. (1995). Asymmetric autocatalysis and amplification of enantiomeric excess of a chiral molecule. *Nature*, *378*(6559), 767–768. Online: https://doi.org/10.1038/378767a0

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Srinivasan, N. G., Corrigan, J. J., y Meister, A. (1962). D-serine in the blood of the silkworm *Bombyx mori* and other lepidoptera. *Journal of Biological Chemistry*, *237*(12), 3844–3845.

Stevens, K. M., y Warnecke, T. (2023). Histone variants in archaea – an undiscovered country. *Seminars in Cell and Developmental Biology*, *135*, 50–58. Online: https://doi.org/10.1016/j.semcdb.2022.02.016

Su, X., Cheng, X., Wang, Y., y Luo, J. (2022). Effect of different D-amino acids on biofilm formation of mixed microorganisms. *Water Science and Technology*, *85*(1), 116–124. Online: https://doi.org/10.2166/wst.2021.623

Suzuki, M., Sasabe, J., Miyoshi, Y., Kuwasako, K., Muto, Y., Hamase, K., … Aiso, S. (2015). Glycolytic flux controls D-serine synthesis through glyceraldehyde-3-phosphate dehydrogenase in astrocytes. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *112*(17), E2217–E2224. Online: https://doi.org/10.1073/pnas.1416117112

Tanizawa, K., Masu, Y., Asano, S., Tanaka, H., y Soda, K. (1989). Thermostable D-amino acid aminotransferase from a thermophilic *Bacillus* species. purification, characterization, and active site sequence determination. *Journal of Biological Chemistry*, *264*(5), 2445–2449.

Tran, X., Keskin, E., Winkler, P., Braun, M., y Kolukisaoglu, Ü. (2023). The chloroplast envelope of angiosperms contains a peptidoglycan layer. *Cells*, *12*(4), 563. Online: https://doi.org/10.3390/cells12040563

Wang, H., Wolosker, H., Pevsner, J., Snyder, S., y Selkoe, D. (2000). Regulation of rat magnocellular neurosecretory system by D-aspartate: evidence for biological role(s) of a naturally occurring free D-amino acid in mammals. *Journal of Endocrinology*, *167*(2), 247–252. Online: https://doi.org/10.1677/joe.0.1670247

Yoshimura, T., Nishikawa, T., y Homma, H. (Eds.). (2016). D-*amino acids*. Tokyo: Springer Japan. Online: https://doi.org/10.1007/978-4-431-56077-7

Yu, Y., Liu, N.-H., Teng, Z.-J., Chen, Y., Wang, P., Zhang, Y.-Z., … Zhang, Y.-Q. (2024). Evidence for archaeal metabolism of D-amino acids in the deep marine sediments. *Science of The Total Environment*, *948*, 174723. Online: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174723

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

La Granja: Revista de Ciencias de la Vida
pISSN:1390-3799; eISSN:1390-8596
https://doi.org/10.17163/lgr.n44.2026.03

Edición Especial / Special Issue
Quiralidad a diferentes escalas

CC BY NC SA

Tendencia a la asimetría funcional y quiralidad helicoidal inducida por microsatélites en *Staphylococcus aureus*

Tendency to Functional Asymmetry and Microsatellite-Induced Helical Chirality in *Staphylococcus aureus*

Ernesto Ríos-Willars[1], María Magdalena Delabra-Salinas*[2] y Mónica Itzel García Martínez[1]

[1]*Universidad Autónoma de Coahuila. Facultad de Sistemas Unidad Saltillo. Coahuila-México.* [https://ror.org/00dpnh189]
[2]*Universidad Autónoma de Coahuila. Facultad de Enfermería Unidad Saltillo. Coahuila-México.* [https://ror.org/00dpnh189]

*Autor para correspondencia: magdalena-delabra-salinas@uadec.edu.mx

Manuscrito recibido el 2 de marzo de 2026. Aceptado, tras revisión el 30 de julio de 2026. Publicado el 1 de septiembre de 2026.

Resumen

Staphylococcus aureus presenta una distribución genómica rica en microsatélites, lo que puede inducir asimetrías funcionales y sesgos de quiralidad helicoidal. Se analizaron cuatro genomas reportados en la base de datos NCBI y se cuantificaron los motivos repetitivos ATAT, ACAC y AGAG en todos los genes mediante la herramienta MFind y los gráficos de superficie. Se observaron diferencias reproducibles en la topografía de picos y valles entre genomas, con un patrón consistente de similitud en Gn2–Gn4 y un marcado desvío en Gn1. Mientras que ATAT predominó en Gn2–Gn4, Gn1 mostró un enriquecimiento atípico de ACAC. Este cambio en el motivo dominante, junto con el desplazamiento de máximos entre genomas, sugiere una variación en la disposición local de las repeticiones compatible con efectos quirales (asimetrías entre hebras, repeticiones invertidas y posibles transiciones entre patrones en espejo). Tales configuraciones son plausibles moduladoras de la direccionalidad regulatoria, de la formación de estructuras secundarias y de la propensión a la recombinación. Metodológicamente, se destaca que la métrica empleada puede verse influida por la longitud de las regiones y de los genes analizados. En el análisis de tres motivos en cuatro genomas, los patrones observados ofrecen un mapa comparativo inicial de la dimensión quiral en la arquitectura repetitiva de *S. aureus* y motivan análisis mecanísticos que integren evidencia estructural y funcional para cuantificar la contribución de la quiralidad a la variación genómica entre linajes. Se ponen a disposición los genomas, las tablas de cuantificación de microsatélites y los cálculos del índice propuesto de tendencia al cambio de quiralidad: https://www.usegalaxy.org/u/rioswillars/h/s-aureus-microsatellite.

Palabras clave: *Staphylococcus aureus*, quiralidad, microsatélite, genoma.

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Abstract

Staphylococcus aureus exhibits a microsatellite-rich genomic architecture that can induce functional asymmetries and helical chirality biases. We analyzed four genomes reported in the NCBI database and quantified ATAT, ACAC, and AGAG repetitive motifs in all genes using the MFind tool and surface plots. Reproducible differences in peak and valley topography between genomes were revealed, with a consistent pattern of similarity in Gn2–Gn4 and a marked deviation in Gn1. While ATAT predominated in Gn2–Gn4, Gn1 showed an atypical enrichment of ACAC. This change in the dominant motif, together with the displacement of maxima between genomes, suggests variation in the local arrangement of repeats compatible with chiral effects (asymmetries between strands, inverted repeats, and possible transitions between mirror patterns). Such configurations are plausible modulators of regulatory directionality, secondary structure formation, and recombination propensity. Methodologically, we highlight that the length of the regions and genes analyzed can influence the metric used. In the analysis of three motifs in four genomes, the observed patterns offer an initial comparative map of chiral dimension in the repetitive architecture of *S. aureus* and motivate mechanistic analyses that integrate structural and functional evidence to quantify the contribution of chirality to genomic variation between lineages. Genomes, microsatellite quantification tables, and calculations of the proposed chirality change trend index are available at https://www.usegalaxy.org/u/rioswillars/h/s-aureus-microsatellite.

Keywords: *Staphylococcus aureus*, chirality, microsatellite, genome.

Forma sugerida de citar: Ríos-Willars, E., Delabra-Salinas, M. y García-Martínez, M. (2026). Tendencia a la asimetría funcional y quiralidad helicoidal inducida por microsatélites en *Staphylococcus aureus*. *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida.* Vol. 44(2):42-59. https://doi.org/10.17163/lgr.n44.2026.03.

Orcid IDs:

Ernesto Ríos-Willars: https://orcid.org/0000-0002-7157-8884
María Magdalena Delabra-Salinas: https://orcid.org/0000-0002-4467-191X
Mónica Itzel García Martínez: https://orcid.org/0009-0000-2869-9747

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

1 Introducción

Staphylococcus aureus es una bacteria grampositiva de forma esférica que forma agrupaciones similares a los racimos de uvas, y es conocida por su capacidad para causar una amplia gama de infecciones en humanos, desde infecciones menores de la piel hasta enfermedades graves como la sepsis y la endocarditis (Larkin y cols., 2009; Gherardi, 2023; Tong y cols., 2015). Por esta razón, se ha aislado en aguas residuales, en agua y en suelos contaminados (Heaton y cols., 2020; Ramos y cols., 2022). El estudio genómico de esta bacteria es importante porque respalda los procesos bioinformáticos destinados a prevenir infecciones en animales y en humanos. En este sentido, los microsatélites son repeticiones de nucleótidos presentes en el ADN; en bacterias, se encuentran en menor cantidad que en otros organismos porque suelen estar sujetos a una presión mutacional que favorece su eliminación. Sin embargo, suelen encontrarse en regiones del genoma bacteriano donde aportan capacidades adaptativas a través de la evolución y la selección natural.

Entre las características principales de *S. aureus* se encuentran la patogenicidad y la virulencia, ya que emplea una variedad de factores, entre ellos la producción de toxinas para causar infecciones. Estas toxinas pueden desencadenar respuestas inmunitarias graves, como fiebre y choque (Oliveira y cols., 2018; Ahmad-Mansour y cols., 2021). Adicionalmente, presenta resistencia a los antibióticos, lo cual constituye una de sus características más preocupantes; por ejemplo, la resistencia a la meticilina (MRSA) y a la vancomicina (VRSA). Esta resistencia complica el tratamiento de las infecciones y constituye un problema en los hospitales (Archer, 1998; Idrees y cols., 2021).

En cuanto a las infecciones, *S. aureus* es responsable de infecciones en diversos sistemas del cuerpo, incluidas infecciones de la piel, osteomielitis, endocarditis, neumonía y otras (Kwiecinski y Horswill, 2020). Por otro lado, se encuentra presente en polvo, heces, superficies y camas en granjas de cerdos y aves; incluso, los niveles de estafilococos en el aire y en el polvo pueden ser muy altos cerca de las naves (Pedersen y cols., 2024; Gladding y cols., 2020; George y cols., 2020) o de las estructuras físicas de crianza de animales.

Para el ser humano es un patógeno comúnmente asociado a infecciones del pie diabético, lo que contribuye de manera significativa a la morbilidad y la mortalidad en los pacientes. Este microorganismo es el patógeno más frecuentemente aislado en infecciones del pie diabético (Shettigar y Murali, 2020). Entre las diversas toxinas y factores de virulencia se encuentran TSST-1, leucocidinas, enterotoxinas y exfoliatinas, que desempeñan un papel crucial en la colonización e infección de las heridas del pie diabético (Dunyach-Remy y cols., 2016). Las cepas de *S. aureus* aisladas de úlceras del pie diabético pueden inducir una respuesta inflamatoria significativa, la cual está influenciada por los niveles de glucosa y sus metabolitos (Wu y cols., 2023). Respecto de las relaciones de la infección por *S. aureus* en heridas, se sabe que esta puede inducir una respuesta inflamatoria alterada en el hospedero, lo que puede inhibir la cicatrización. Por ejemplo, la inducción de miR-15b-5p por *S. aureus* puede suprimir la respuesta inflamatoria y afectar negativamente la curación (Ramirez y cols., 2018). El polvo de las granjas puede contener MRSA (*S. aureus* resistente a la meticilina) y dispersarse a cientos de metros, aumentando la exposición de granjeros, vecinos y sus casas a bacterias resistentes (Crespo-Piazuelo y Lawlor, 2021; Wang y cols., 2023). Las heridas abiertas, húmedas y con tejido necrótico, creadas o ampliadas por el gusano barrenador, favorecen la colonización por *S. aureus* y otras bacterias patógenas (Sayhood y cols., 2022).

Por otro lado, los microsatélites en bacterias son secuencias cortas de ADN repetidas en tándem, también conocidas como repeticiones de secuencias simples (SSR, por sus siglas en inglés), que constan de motivos de nucleótidos de 1 a 6 pares de bases. Estas secuencias son altamente mutables y se encuentran en diversas ubicaciones del genoma bacteriano. Son marcadores genéticos importantes debido a su alta tasa de mutación, la cual contribuye a la variabilidad genética y a la evolución del genoma microbiano (Saeed y cols., 2016). En bacterias patógenas, la inestabilidad de los microsatélites puede regular la expresión génica mediante la variación de fase, un mecanismo que permite cambios rápidos y reversibles en la expresión de fenotipos, como se observa en otros microorganismos (Martin y cols., 2005). Sin embargo, en las bacterias existe un sesgo mutacional hacia la contracción de repeticiones de microsatélites, lo que puede conducir

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

a su extinción en ausencia de selección natural, a diferencia de los eucariotas, donde las repeticiones tienden a expandirse (Metzgar y cols., 2002). En la investigación realizada en este trabajo, no se encontraron estudios relacionados con los microsatélites en *S. aureus*; sin embargo, en *Escherichia coli* se ha identificado que entre el 1.75 % y el 2.85 % de todos los microsatélites son compuestos, es decir, consisten en dos o más repeticiones próximas. Estos microsatélites compuestos están representados de manera significativamente mayor en los genomas bacterianos. Aunque menos comunes, los microsatélites en bacterias pueden desempeñar un papel importante en la regulación génica y aportar variabilidad funcional adaptativa. Esto sugiere que, aunque la presión mutacional tiende a eliminarlos, aquellos que se mantienen pueden estar sujetos a selección por sus funciones adaptativas (Srivastava y cols., 2019).

El genoma bacteriano está compuesto por ADN de doble hélice B-ADN de dextrógira; esta es la quiralidad química básica compartida con otros seres vivos (Winogradoff y cols., 2021; Yu y cols., 2025). La doble hélice derecha determina la formación de cruces entre segmentos de ADN y la estabilización de superenrollamientos positivos y negativos (Timsit y Várnai, 2010). La quiralidad de los cruces dextrógiros frente a los levógiros modula la estabilidad física del ADN y puede haber influido en la selección evolutiva que mantiene genomas mayoritariamente con superenrollamiento negativo en las bacterias mesófilas. Enzimáticamente, las topoisomerasas, como la ADN girasa, reconocen y capturan cruces de ADN de una quiralidad específica para introducir o relajar superenrollamientos (Vayssières y cols., 2024).

Finalmente, los microsatélites pueden cambiar la arquitectura tridimensional del ADN porque, aunque no alteran su quiralidad química, inducen la tensión torsional, lo que puede favorecer a las estructuras como A-ADN (compacto, enrollamiento más apretado), Z-ADN (hélice levógira, quiralidad opuesta), bucles en horquilla, cruciformes y deslizamiento de cadena (Gadgil y cols., 2020; Bagshaw, 2017). Esto no cambia la quiralidad química, pero sí la conformación helicoidal, lo que hace que alguna región del ADN se comporte de manera distinta debido a su geometría, flexibilidad o torsión (Bacolla y cols., 2008). Por ejemplo, el microsatélite ATAT es extremadamente flexible, por lo que adopta pequeñas curvaturas; mientras que ACAC y CGCG son más rígidos, lo cual favorece la geometría alternante (Song y cols., 2021).

En patógenos como *S. aureus*, la inestabilidad espacial y estructural de los microsatélites no es un mero artefacto del genoma, sino que actúa como "loci de contingencia" que impulsan la variación de la fase (*phase variation*) (Brooks y Jefferson, 2014). Los cambios conformacionales derivados de la quiralidad y la tensión torsional, como la formación de estructuras de bucle en repeticiones de tetranucleótidos como ACAC, incrementan la tasa de deslizamiento de la cadena durante la replicación (Harhay y cols., 2019). Esta reconfiguración arquitectónica facilita las mutaciones reversibles (inserciones/delecciones) que encienden o apagan rápidamente la expresión génica. Biológicamente, estas diferencias estructurales permiten a las cepas humanas como MRSA adaptar su virulencia, controlando los procesos clave como la formación de biopelículas (mediante el operón *ica*) para evadir los antibióticos o modulando el sistema regulador para sobrevivir como un "caballo de Troya" dentro de los macrófagos del hospedero (Gor y cols., 2021). Por lo tanto, el término "caso atípico" en el contexto del análisis de microsatélites se refiere a los arreglos genómicos que, al desviar su quiralidad y su geometría estándar, confieren a ciertos linajes una plasticidad fenotípica superior en cuanto a resistencia e infectividad.

En este contexto, se realiza un estudio de los microsatélites presentes en los genomas de *Staphylococcus aureus* reportados en la base de datos NCBI (Sayers y cols., 2025) en distintos años. Posteriormente, con esta información se realiza una estimación del cambio de quiralidad en el genoma.

2 Materiales y Métodos

Se descargaron cuatro genomas de *Staphylococcus aureus*, referenciados aquí como Gn1, Gn2, Gn3 y Gn4. La información general de dichos genomas se describe a continuación:

El genoma Gn1 (cepa MRSA_TCH60) está registrado en la base de datos del NCBI por el Baylor College of Medicine a partir de una muestra de piel

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

humana (*Homo sapiens*). Clínicamente, TCH60 es un genoma de referencia representativo del linaje CC30-ST30-IV. Este complejo clonal (CC30/ST30) es de gran importancia epidemiológica, ya que desciende de la cepa pandémica del fago 80/81 y ha evolucionado hacia el «*Southwest Pacific clone*», una variante comunitaria de MRSA altamente virulenta y distribuida a nivel global y responsable de infecciones invasivas severas (Essien y cols., 2022; Guillén y cols., 2024). Bioinformáticamente, el ensamblaje y la validación de esta cepa se realizaron empleando Clusterflock (Narechania y cols., 2016). En este se reportan un tamaño de 2.8 megabases y dos cromosomas; un porcentaje de GC del 33 %, así como 2790 genes, de los cuales 2700 están identificados como codificantes. Fue secuenciada con la tecnología 454 GS FLX de Illumina. La fecha de registro de los detalles de la anotación es el 28 de agosto de 2013. Este registro es accesible en el siguiente enlace: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/datasets/genome/GCA_000159535.2/.

A continuación se describe el genoma denominado Gn2 (cepa MRSA252). Se trata de un genoma de 2.9 megabases, con un contenido de GC del 33 %. Clínicamente, esta cepa es representativa del clon epidémico hospitalario EMRSA-16 (tipo de secuencia ST36) y fue aislada de un caso de septicemia fatal. El análisis de su genoma completo demostró que es un linaje altamente divergente, caracterizado por una rápida evolución hacia la virulencia y multirresistencia impulsada por la adquisición de elementos genéticos móviles, como el casete cromosómico SCC*mec* tipo II y múltiples profagos (Holden y cols., 2004). En la base de datos NCBI, a partir de metadatos de un hábitat asociado a un animal, se reporta que corresponde a una colección original de 1998. En este caso se identificaron 2746 genes, de los cuales 2656 fueron considerados codificantes. Este registro es público en el enlace: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/datasets/genome/GCA_000011505.1/.

El genoma denominado Gn3 (cepa CC239-MRSA-III var) corresponde a un aislamiento en un hospedero humano (*Homo sapiens*) de Trinidad y Tobago. Clínicamente, este linaje pertenece al Complejo Clonal 239 (CC239), uno de los clones epidémicos hospitalarios más ampliamente distribuidos a nivel mundial y de gran prevalencia en las muestras clínicas de las islas del Caribe, cuyo genoma fue secuenciado y registrado por el Leibniz Institute of Photonic Technology (Monecke y cols., 2023). La tecnología de secuenciación empleada fue Oxford Nanopore MinION el 5 de junio de 2023. En este se reportan 3152 genes, de los cuales 2940 se identificaron como codificantes. El porcentaje de GC es del 32.5 % y el tamaño del genoma es de 3.1 megabases. Este registro se puede acceder en el siguiente enlace: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/datasets/genome/GCA_030252755.1/.

Finalmente, se analizó el genoma denominado Gn4 (cepa HP20814-043), el cual tiene un tamaño de 2.9 megabases y un porcentaje de GC del 33 %. Clínicamente, representa un aislamiento resistente al linezolid obtenido a partir de un paciente con fibrosis quística (*Homo sapiens*) procedente de University of Iowa Hospitals and Clinics, Estados Unidos. El análisis evolutivo de esta cepa revela una profunda adaptación bajo estrés antibiótico, destacando la deleción de los genes de reparación del ADN (*mutS* y *mutL*), lo cual le confiere un fenotipo hipermutable ideal para el estudio de la variación de repeticiones en tándem. Su validación bioinformática se procesó bajo las estrategias de representación de bases de datos RefSeq (Tatusova y cols., 2015). En este genoma se reportaron 2860 genes, de los cuales 2631 se identificaron como codificantes. Este genoma está disponible en el siguiente enlace: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/datasets/genome/GCF_030409015.1.

La elección exclusiva de los motivos tetranucleotídicos ATAT, AGAG y ACAC se debe a razones termodinámicas asociadas al mecanismo de variación de fase. Se ha documentado que los microsatélites involucrados en eventos de deslizamiento de la cadena tienden a ser ricos en adenina y timina (A/T), lo cual facilita el «derretimiento» (*melting*) local de la doble hélice del ADN y produce hipermutabilidad (Zhou y cols., 2014). A diferencia de las secuencias compuestas puramente por guanina y citosina como CGCG, que poseen una alta estabilidad térmica que restringe severamente su apertura local, los motivos ATAT, AGAG y ACAC combinan lo necesario para permitir este derretimiento con una diversidad de comportamientos topológicos. Las repeticiones de estos microsatélites actúan como un motor evolutivo clave para la rápida adaptación y supervivencia de bacterias patógenas (Saeed y cols., 2016), por lo que esta selección específica de

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

motivos ricos en A/T resulta ecológicamente representativa y coherente con el bajo contenido de GC (aproximadamente 33 %) característico del genoma de *S. aureus*.

El método de procesamiento para el análisis de microsatélites consiste en utilizar la herramienta MFind (Rios-Willars y Chirinos-Arias, 2024). A diferencia de los métodos genéricos basados en el alineamiento múltiple de secuencias (MSA), MFind emplea un algoritmo de «ventana deslizante» (*sliding window*) de procesamiento paralelo que realiza un conteo exacto de motivos, independientemente de su posición. Adicionalmente, su elección se fundamenta en que es una herramienta de uso libre, con una interfaz gráfica sencilla, cuya eficiencia computacional permite explorar genomas completos en equipos de cómputo convencionales, sin requerir infraestructura de supercómputo. El software MFind está disponible en el repositorio de GitHub del autor: https://github.com/riosew/Mfind y consiste en que, dado el problema, se proporciona la secuencia PS de longitud ρ que contiene las subsecuencias (SP) para la búsqueda. $SP = \{SP_1 \dots SP_n\}$ y el conjunto de secuencias $S = \{1 \dots N\}$ donde N es el número de secuencias en el conjunto. Con un SP_x con el tamaño k, el tamaño del problema TP se define como:

$$TP = (\rho - k)N \tag{1}$$

El número de operaciones N_e indica el recuento de ventanas en cada secuencia de S con tamaño k y se define como:

$$N_e = \sum_{1}^{TP} \sum_{1}^{OC} (Ct + 1) \tag{2}$$

Donde (Ct) es el contador de aciertos y (OC) es el número de subsecuencias que coinciden en la ventana deslizante. El proceso de búsqueda se ejecuta mediante iteraciones paralelas programadas en Java para aprovechar al máximo los recursos de hardware y reducir el tiempo de ejecución. Se realizan seis evaluaciones simultáneas por iteración. Con esto, se integra una base de datos de resultados que consiste en el conteo de microsatélites de cada gen, la cual posteriormente se utiliza para generar gráficos y realizar análisis estadísticos con el software Minitab 16. Posteriormente, con el fin de cuantificar la tendencia de una región del ADN a adoptar conformaciones helicoidales alternativas, se definió el Índice de Propensión al Cambio de Quiralidad (IQZ). Este índice integra tres componentes independientes derivados de la secuencia: el contenido de GC, la presencia de patrones alternantes purina-pirimidina y la densidad de microsatélites repetitivos. Cada uno de estos factores está relacionado con propiedades fisicoquímicas y estructurales que favorecen la transición local de la conformación B-ADN a estados alternativos, como el Z-ADN.

El índice se expresa como:

$$IQZ = w_1 \cdot GC_score + w_2 \cdot Alt_score + w_3 \cdot MS_score \tag{3}$$

Donde:

$$GC_score = \frac{\%GC}{100} \tag{4}$$

Representa la proporción de las bases G y C en la región analizada. Las regiones con mayor contenido de GC presentan una mayor rigidez torsional y una mayor propensión a estabilizar la conformación Z-DNA.

Alt_score es el número de bases que forman patrones alternantes purina–pirimidina dividido por la longitud total de la secuencia; en este caso, el gen analizado. Esto cuantifica la proporción de bases organizadas en patrones alternantes repetidos (por ejemplo, ATAT y ACAC), lo que reduce la energía necesaria para la inversión de la helicidad. Finalmente,

$$MS_score = \frac{\text{Longitud total de microsatélites}}{Lmax} \tag{5}$$

Estima el efecto torsional debido a la presencia de microsatélites. La variable *Lmax* corresponde al tamaño máximo esperado de estas repeticiones para los efectos de normalización; se usó el valor máximo de *hits* contabilizados por la herramienta MFind entre los genes analizados.

Los coeficientes w_1, w_2 y w_3 permiten ajustar la contribución relativa de cada parámetro. En este estudio se utilizaron los valores $w_1 = 0.4$, $w_2 = 0.4$ y $w_3 = 0.2$, asignando mayor peso al contenido GC y a la alternancia purina–pirimidina, que son los predictores más relevantes de transición a Z-DNA. Este índice proporciona una medida normalizada entre 0

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

y 1, lo que facilita la comparación entre distintas regiones genómicas y permite identificar segmentos con alta propensión a modificar su arquitectura helicoidal.

3 Resultados y Discusión

La ubicación de los microsatélites en el genoma bacteriano suele ser específica de regiones funcionales, lo que sugiere que han evolucionado bajo selección para desempeñar funciones específicas. Para *S. aureus*, estas funciones pueden estar relacionadas con su capacidad de causar infecciones cutáneas y, en consecuencia, con las heridas del pie diabético. A continuación, se describen los resultados obtenidos. La Figura 1 ilustra la superficie generada a partir del análisis de los microsatélites ATAT, AGAG y ACAC del genoma 1 (Gn1). Se observa un pico en la esquina superior derecha, correspondiente a los valores más altos del conteo de microsatélites (*hits*) por gen en el genoma.

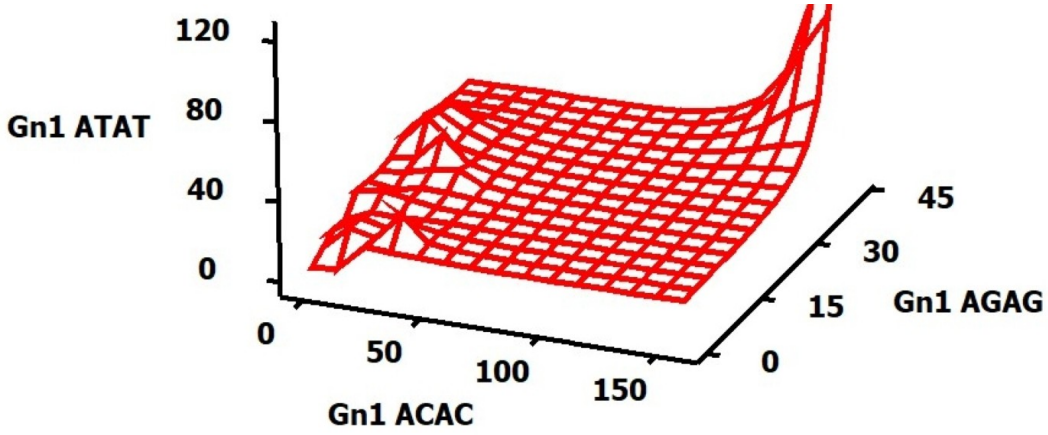


Figura 1. Gráfica de superficie de los microsatélites en el genoma Gn1 de *S. aureus*. El eje vertical representa la frecuencia del motivo ATAT en función de la coocurrencia de los motivos ACAC y AGAG. Los picos indican genes con una acumulación anómala conjunta de estos tetranucleótidos.

Asimismo, se observa una caída en la esquina inferior izquierda, lo que sugiere que los microsatélites tienden a desaparecer conjuntamente en esta región. Finalmente, hay una región plana y prominente en el centro de la superficie, donde se observa que, mientras los microsatélites AGAG y ACAC aumentan, el microsatélite ATAT permanece ausente. Respecto de la distribución, la Figura 2 muestra los gráficos de caja de las tres variables, en los que se observan casos atípicos en ATAT y en ACAC. Estos son genes que presentaron un número extraordinario de microsatélites y, al mismo tiempo, constituyen el origen del pico en la gráfica de superficie.

En el análisis de Gn2 se obtuvo la gráfica de superficie de las variables ATAT, ACAC y AGAG. La Figura 3 muestra la superficie en la que se observa un pico cerca de la orilla derecha, así como otro pico cerca de la parte central. Esto sugiere una redistribución del genoma y la reubicación correspondiente de los microsatélites. También se aprecia un valle o una región plana de menor extensión que la del resultado anterior, lo que también indica una dispersión de microsatélites.

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

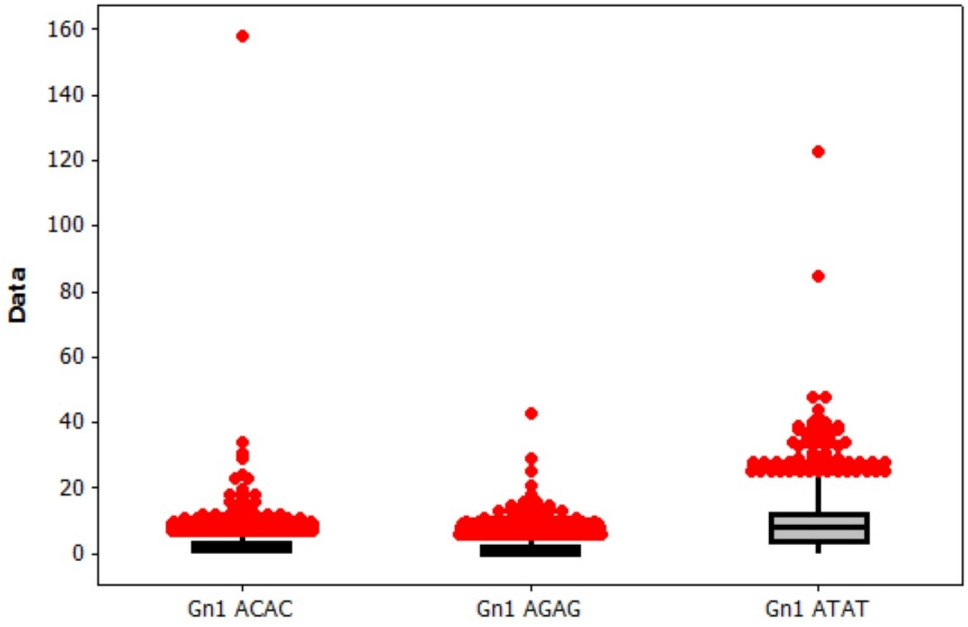


Figura 2. Gráfico de caja de las frecuencias de los motivos ACAC, AGAG y ATAT en los genes del genoma Gn1. Los puntos individuales fuera de los bigotes representan genes que poseen una cantidad extraordinaria de microsatélites en comparación con la tendencia central del genoma.

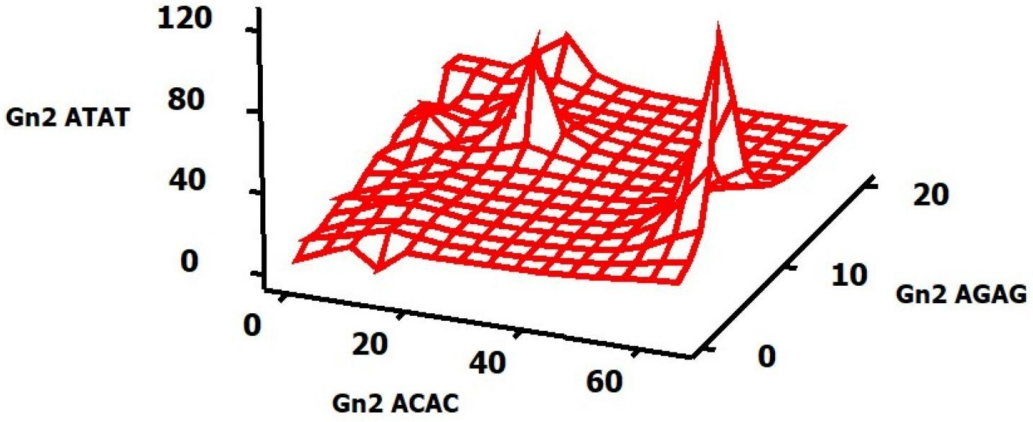


Figura 3. Gráfico de superficie de los microsatélites del genoma Gn2 de *S. aureus*. El eje vertical representa la frecuencia del motivo ATAT en función de la coocurrencia de los motivos ACAC y AGAG. Los picos indican genes con una acumulación anómala conjunta de estos tetranucleótidos.

Por otro lado, la gráfica de caja de la Figura 4, correspondiente a los microsatélites en Gn2, ilustra los hallazgos. Se pueden observar los casos atípicos en ATAT que, a su vez, generan los picos observados en la gráfica de superficie. Cabe destacar que, para AGAG y ACAC, la mayor parte de los puntos se sitúan cerca del valor cero, lo que indica que la mayoría de los genes de Gn2 presentan pocos o nulos microsatélites de este tipo.

Respecto de Gn3, también se obtuvo un gráfico de superficie de las variables ATAT, AGAG y ACAC. La Figura 5 ilustra esta representación.

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

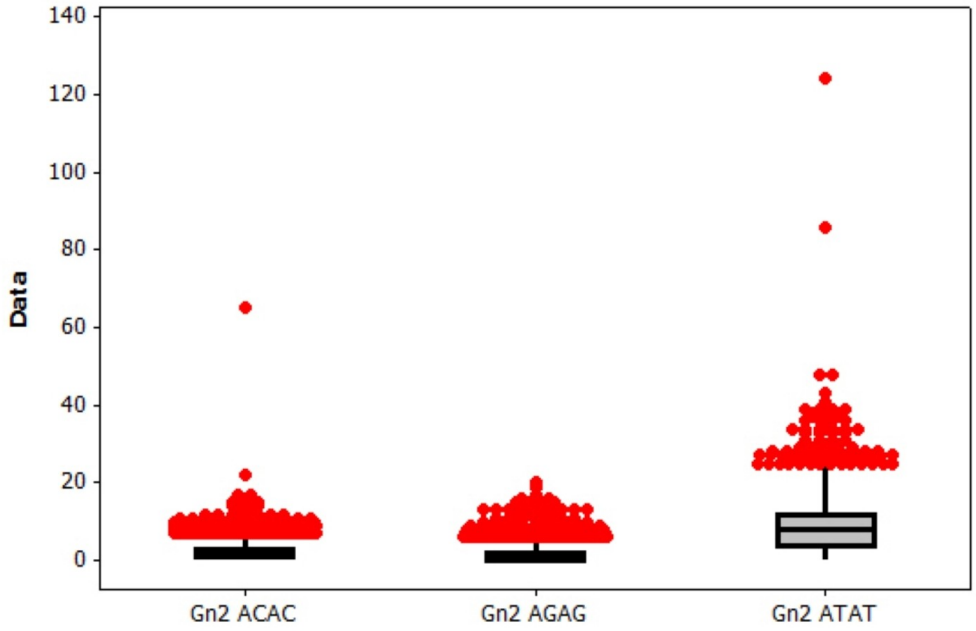


Figura 4. Gráfico de caja de las frecuencias de los motivos ACAC, AGAG y ATAT en los genes del genoma Gn2. Los puntos individuales fuera de los bigotes representan genes que poseen una cantidad extraordinaria de microsatélites en comparación con la tendencia central del genoma.

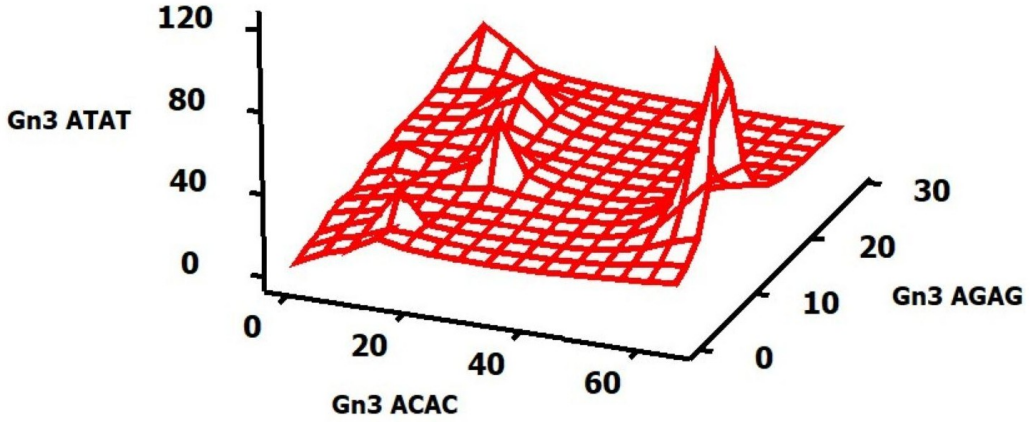


Figura 5. Gráfica de superficie de los microsatélites del genoma Gn3 de *S. aureus*. El eje vertical representa la frecuencia del motivo ATAT en función de la coocurrencia de los motivos ACAC y AGAG. Los picos indican genes con una acumulación anómala conjunta de estos tetranucleótidos.

Se observan rasgos similares en comparación con la figura anterior; sin embargo, también existen diferencias que indican cambios en los microsatélites, por ejemplo, la ubicación de los picos centrales de la imagen. A continuación, la gráfica de caja de la Figura 6 ilustra esta distribución.

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

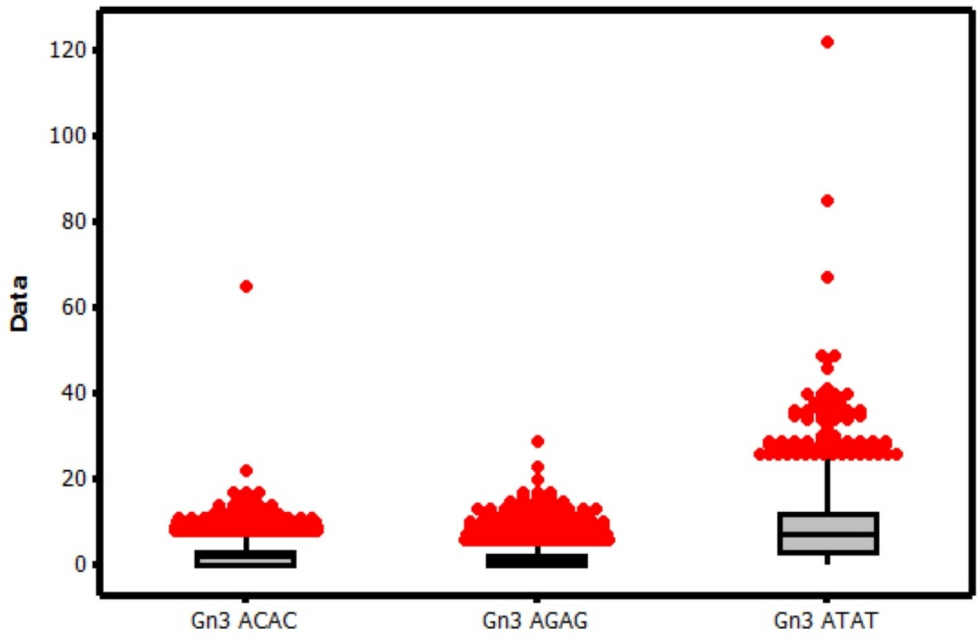


Figura 6. Gráfico de caja de las frecuencias de los motivos ACAC, AGAG y ATAT en los genes del genoma Gn3. Los puntos individuales fuera de los bigotes representan genes con una gran cantidad de microsatélites en comparación con la tendencia central del genoma.

Se observan puntos dispersos en la figura correspondientes a ATAT y AGAG. Esto indica que otros genes, en comparación con el genoma anterior, presentan un mayor número de microsatélites. Finalmente, para Gn4, la Figura 7 muestra la gráfica de superficie correspondiente a los tres microsatélites: ATAT, AGAG y ACAC.

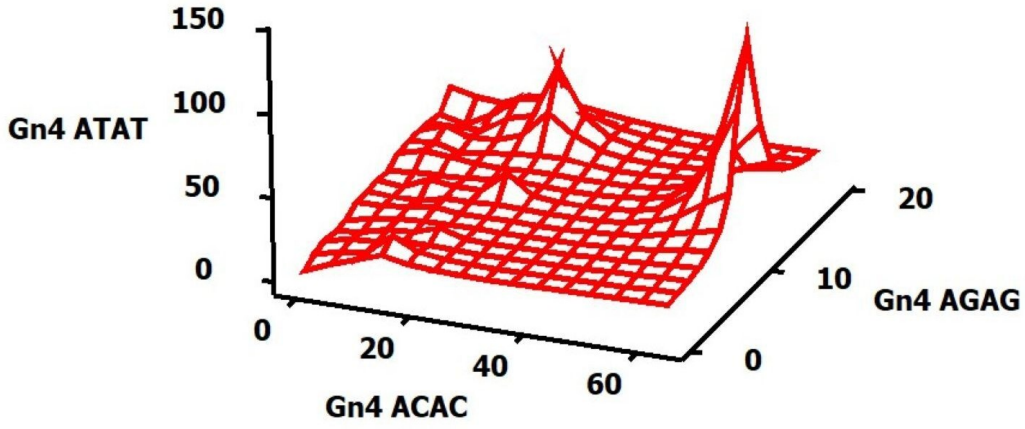


Figura 7. Gráfico de superficie de los microsatélites en el genoma Gn4 de *S. aureus*. El eje vertical representa la frecuencia del motivo ATAT en función de la coocurrencia de los motivos ACAC y AGAG. Los picos indican genes con una acumulación anómala conjunta de estos tetranucleótidos.

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Es destacable que presente un pico en el lado derecho, aunque en una ubicación más cercana a la esquina superior, lo que sugiere nuevos arreglos en los microsatélites. Asimismo, el pico cercano a la esquina superior izquierda presenta una elevación mayor que la del genoma anterior. Por otro lado, la Figura 8 muestra la gráfica de caja de este genoma para el conteo de los microsatélites.

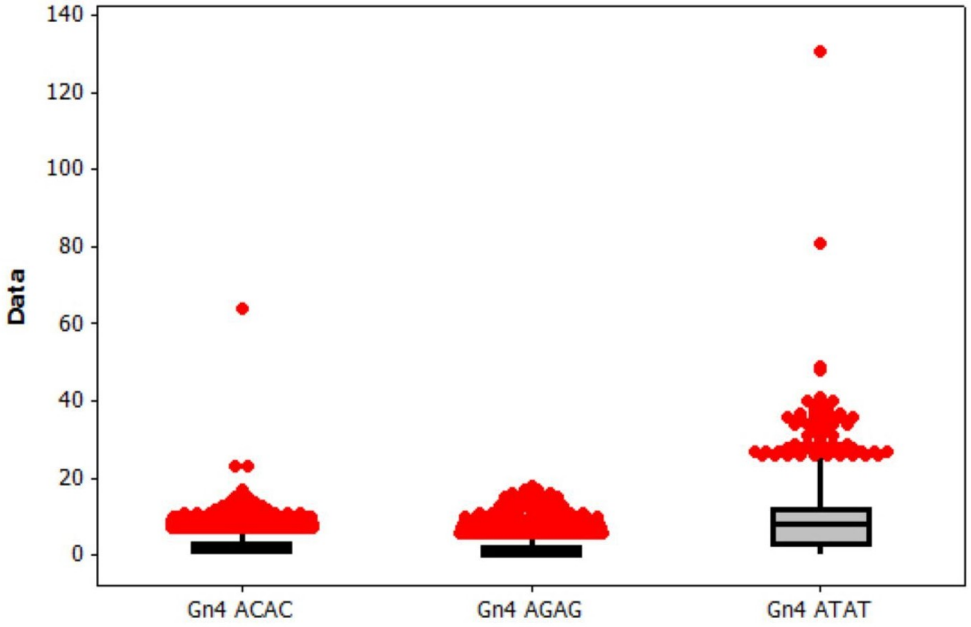


Figura 8. Gráfico de caja de las frecuencias de los motivos ACAC, AGAG y ATAT en los genes del genoma Gn4. Los puntos individuales fuera de los bigotes representan genes con una cantidad extraordinaria de microsatélites en comparación con la tendencia central del genoma.

Se observa que, para AGAG, el conteo de microsatélites se mantuvo prácticamente por debajo de los demás, sin casos atípicos. Asimismo, para ACAC, la distribución cambió, mientras que ATAT parece aumentar sus niveles en comparación con los otros genomas. A continuación, la Tabla 1 presenta la estadística descriptiva de la media, el mínimo y el máximo de las tres variables en los genomas Gn1, Gn2, Gn3 y Gn4. Destaca que, en todos los casos, los valores medios de la variable ATAT son superiores, lo cual indica una mayor presencia de microsatélites ATAT. Sin embargo, el valor más alto se observó en el genoma Gn1 para la variable ACAC, con un valor de 158. Respecto de los resultados obtenidos, en la plataforma Galaxy se puede encontrar una carpeta con los genomas Gn1, Gn2, Gn3 y Gn4 en formato .fna para su descarga. Asimismo, se ponen a disposición los documentos en formato .csv de los procesamientos realizados con la herramienta MFind para cada microsatélite de los genomas. De esta manera, por ejemplo, para el genoma 1 están disponibles los archivos Gn1 ACAC.csv, Gn1 ATAT.csv y Gn1 AGAG.csv. Del mismo modo, se presentan los archivos .csv correspondientes al resto de los genomas, junto con las tablas del cálculo del IQZ para cada uno de ellos, disponibles en el siguiente enlace: https://www.usegalaxy.org/u/rioswillars/h/s-aureus-microsatellite

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Tabla 1. Estadística descriptiva de las variables ATAT, AGAG y ACAC en los genomas Gn1, Gn2, Gn3 y Gn4.

Genoma	Variable	Media	Desv. Est	Min	Max
Gn1	ACAC	2.47	4.03	0	158
Gn1	AGAG	1.5688	2.4365	0	43
Gn1	ATAT	8.722	7.286	0	123
Gn2	ACAC	2.3752	2.7245	0	65
Gn2	AGAG	1.5338	2.2454	0	20
Gn2	ATAT	8.705	7.26	0	124
Gn3	ACAC	2.3016	2.6768	0	65
Gn3	AGAG	1.5826	2.348	0	29
Gn3	ATAT	8.618	7.36	0	122
Gn4	ACAC	2.3844	2.7234	0	64
Gn4	AGAG	1.5654	2.2614	0	18
Gn4	ATAT	8.484	7.162	0	131

En este estudio se calculó el índice compuesto IQZ para cuatro genomas de *Staphylococcus aureus* (Gn1–Gn4) a partir de tres componentes normalizados: GC_norm, Alt_Score y MS_score, ponderados con 0.4, 0.4 y 0.2, respectivamente. Esta combinación integra la composición nucleotídica (GC_norm) con métricas cuantitativas derivadas de los patrones de *hits* (Alt_Score y MS_score), lo que proporciona una métrica unificada para priorizar las secuencias. El cálculo de IQZ se aplicó a todos los genes de cada genoma y se elaboraron las tablas de cuantificación. En todos los casos, se observa que los valores más altos de IQZ se asocian con segmentos que, simultáneamente, presentan perfiles GC moderados a altos, así como un elevado conteo de microsatélites, tanto en densidad como en prominencia relativa. Esto indica que IQZ privilegia regiones en las que las métricas basadas en los patrones y en la composición GC convergen.

En Gn1, las secuencias con mayor IQZ corresponden a regiones extensas con Alt_Score elevado (métrica de densidad del patrón por unidad de longitud) y MS_score alto (métrica de prominencia intragenómica normalizada). En Gn2 y Gn3, los máximos de IQZ presentan un comportamiento similar: los candidatos principales combinan GC_norm por encima del promedio, una relación favorable de aciertos/longitud y un aumento relativo en el genoma. En Gn4, el perfil de los máximos de IQZ es concordante con el de Gn2–Gn3, lo que refuerza la reproducibilidad del criterio compuesto en distintos contextos genómicos de *S. aureus*. Comparativamente entre genomas, aunque MS_score es intrínsecamente intragenómico (normalizado al máximo de cada archivo), la estructura de IQZ permite valorar cualitativamente la robustez de las regiones prioritarias en cada genoma. Además, la estabilidad del ordenamiento por IQZ frente a las variaciones moderadas de GC_norm sugiere que las métricas de patrón (Alt_Score y MS_score) capturan adecuadamente la densidad y la prominencia de los motivos, evitando sesgos excesivos por composición. Para la trazabilidad y el uso práctico, la Tabla 2 presenta los listados de las cinco secuencias (genes) con mayor IQZ por genoma (Gn1–Gn4). Estos listados sustentan las conclusiones anteriores y sirven de base para las futuras decisiones, como la validación experimental, el diseño de sondas/cebadores o la priorización de anotaciones. Adicionalmente, la Figura 9 muestra una representación visual del índice IQZ de las secuencias de cada genoma. En conjunto, IQZ se comporta como una métrica sintética y estable para destacar a los candidatos de los segmentos genómicos, integrando de forma equilibrada la composición GC y las métricas cuantitativas del patrón.

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Tabla 2. Listado de los cinco genes con mayor IQZ en cada genoma.

Dataset	seq num	Gen length	hits sum	ACAC hits	AGAG hits	ATAT hits	IQZ
Gn1	1861	31303	324	158	43	123	0.35334
Gn1	1337	74	1	0	1	0	0.270888
Gn1	1325	76	1	0	1	0	0.269038
Gn1	1336	76	1	0	1	0	0.269038
Gn1	1391	72	2	2	0	0	0.262346
Gn2	1447	32241	195	65	6	124	0.34976
Gn2	172	7176	121	22	13	86	0.277447
Gn2	1967	84	2	2	0	0	0.27348
Gn2	1929	89	3	2	1	0	0.27274
Gn2	1983	74	1	1	0	0	0.271296
Gn3	1519	31266	196	65	9	122	0.349261
Gn3	194	7176	120	22	13	85	0.275793
Gn3	2043	84	2	2	0	0	0.273469
Gn3	2060	74	1	1	0	0	0.271291
Gn3	624	76	1	0	1	0	0.269441
Gn4	1491	31875	205	64	10	131	0.348869
Gn4	1962	84	2	2	0	0	0.27338
Gn4	1914	89	3	2	1	0	0.27259
Gn4	1978	74	1	1	0	0	0.271246
Gn4	174	7176	119	23	15	81	0.270445

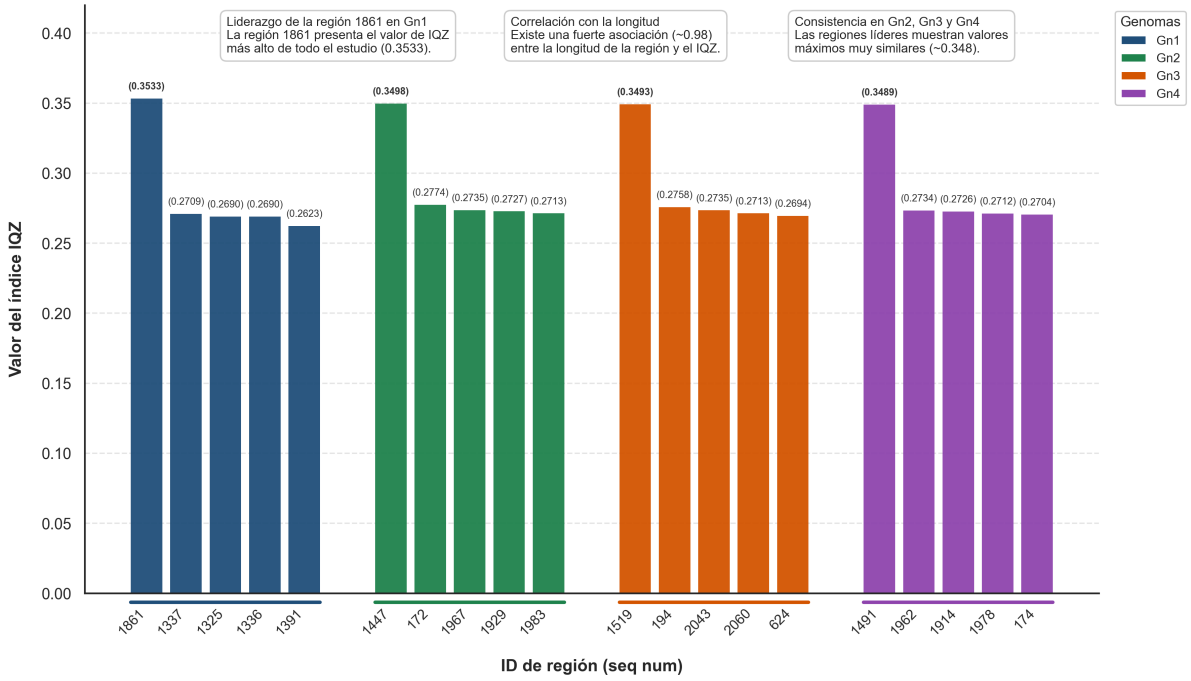


Figura 9. Comparativa del índice de propensión al cambio de quiralidad (IQZ) de los cinco genes con los valores más altos en cada genoma. El gráfico ilustra la magnitud del índice, agrupada por genoma, lo que permite observar las diferencias en la distribución de los valores máximos del genoma Gn1 frente al resto de los linajes.

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Cabe destacar que la longitud de la región está fuertemente relacionada con el IQZ (correlación de 0.98, $p = 0.00$). Las regiones más extensas tienden a tener un IQZ más alto, lo que es consistente con el hecho de que IQZ incluye componentes dependientes de los *hits* y de la longitud, así como de las normalizaciones asociadas.

Finalmente, en la carpeta electrónica de la plataforma Galaxy previamente indicada se incluyen las tablas con los cálculos de las métricas MS_score, Alt_score, GC_norm e IQZ para cada uno de los genes de los genomas Gn1, Gn2, Gn3 y Gn4.

4 Conclusiones

El análisis de microsatélites es una estrategia para comprender la evolución y la adaptación de organismos de interés. En este estudio se describieron en detalle cuatro genomas de *S. aureus*, analizando cada uno de los genes y buscando y contando los microsatélites ATAT, AGAG y ACAC mediante la herramienta MFind, un software de uso libre y descargable para su ejecución en Java, disponible en GitHub. Entre los hallazgos, se observó que el Gn1 presenta diferencias claras respecto de los otros tres genomas. Mientras que Gn2, Gn3 y Gn4 presentan similitudes que permiten identificar regiones similares en las gráficas de superficie, los picos y valles en las gráficas se ubican en diferentes posiciones, lo que sugiere una reorganización de la información genética. Por otro lado, se observó que el conteo de microsatélites fue superior en ATAT en los genomas Gn2, Gn3 y Gn4, lo que constituyó una excepción en Gn1, donde el valor máximo se observó en la variable ACAC, con 158. Esto indica un caso atípico al presentar este número de microsatélites en un gen de este genoma. Finalmente, este trabajo presenta un panorama general de los microsatélites en cuatro genomas reportados para *S. aureus*, siendo esta bacteria la más encontrada en estudios de heridas en humanos y en animales de granja.

Por otro lado, este estudio caracteriza la organización de motivos repetitivos en los cuatro genomas de *Staphylococcus aureus* descritos, con foco en la quiralidad de los patrones y en su variación entre genomas. Los perfiles comparativos muestran que Gn1 se aparta del comportamiento observado en Gn2–Gn4, no solo por el motivo dominante, sino también por el desplazamiento de picos y valles en las superficies de densidad, lo que sugiere diferencias quiralmente relevantes en la disposición local de las repeticiones. En Gn2–Gn4 predomina el motivo ATAT, mientras que en Gn1 se observa un enriquecimiento atípico de ACAC. Esta asimetría en el motivo dominante, junto con el desplazamiento de máximos entre genomas, es consistente con una reconfiguración de la arquitectura repetitiva con componente quiral (diferencias en las orientaciones relativas y posibles transiciones entre motivos en espejo a lo largo del genoma). Tales patrones pueden impactar la direccionalidad y la plasticidad genómica, en la medida en que las repeticiones invertidas o sesgadas entre hebras modulan las propiedades como la formación de estructuras secundarias o la propensión a eventos de recombinación.

La interpretación debe considerar limitaciones: se evaluaron tres motivos (ATAT, AGAG, ACAC), pues existen dependencias del tamaño de la región en las métricas y se empleó la herramienta de detección MFind. Los futuros trabajos deberían incorporar un índice basado en simulaciones tridimensionales, ya que, a diferencia del índice predictivo estadístico actual (IQZ), que se basa en una secuencia lineal (2D), una simulación 3D permitiría medir con exactitud la energía de la tensión torsional y confirmar si la quiralidad alternante induce el plegamiento de estructuras secundarias *in vivo*. Esta validación biofísica es crucial, ya que dichos cambios conformacionales tridimensionales provocan el deslizamiento de la polimerasa y activan el interruptor de variación de fase que regula la virulencia y la adaptación en *S. aureus*. En conjunto, este trabajo proporciona un mapa comparativo que resalta la dimensión quiral, con enfoque en los microsatélites de *S. aureus*, y motiva los análisis mecanísticos para cuantificar su contribución a la variación genómica entre linajes. En este sentido, para estudios posteriores, es importante determinar si estas regiones se presentan en áreas específicas del genoma, como las de baja complejidad, o si se distribuyen de manera delimitada en ellas.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer a la Facultad de Sistemas de la Universidad Autónoma de Coahuila, Unidad Saltillo, por la ayuda brindada durante el desarrollo de este trabajo.

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Financiamiento

Los autores desean agradecer al Centro Nacional de Supercomputación del IPICyT por apoyar esta investigación con la subvención de tiempo computacional TKII-E-1024-I-011024-47.

Declaración de uso de inteligencia artificial

Los autores DECLARAN que, durante la preparación del artículo titulado «Tendencia a la asimetría funcional y quiralidad helicoidal inducida por microsatélites en *Staphylococcus aureus*», no se utilizaron herramientas de inteligencia artificial generativa ni sistemas automatizados de asistencia para la redacción, análisis, interpretación de datos, generación de contenido, traducción o edición del manuscrito.

Los autores asumen plena responsabilidad por el contenido, la originalidad, la integridad y la versión final del artículo.

Contribución de los autores

E.R.W.: Conceptualización, investigación, metodología, software. **M.M.D.S.:** Escritura-borrador original, investigación, curación de datos. **M.I.G.M.:** Escritura-revisión y edición.

Referencias

Ahmad-Mansour, N., Loubet, P., Pouget, C., Dunyach-Remy, C., Sotto, A., Lavigne, J.-P., y Molle, V. (2021). Staphylococcus aureus toxins: An update on their pathogenic properties and potential treatments. *Toxins*, *13*(10), 677. Online: https://doi.org/10.3390/toxins13100677

Archer, G. L. (1998). Staphylococcus aureus: A well–armed pathogen. *Clinical Infectious Diseases*, *26*(5), 1179–1181. Online: https://doi.org/10.1086/520289

Bacolla, A., Larson, J. E., Collins, J. R., Li, J., Milosavljevic, A., Stenson, P. D., ... Wells, R. D. (2008). Abundance and length of simple repeats in vertebrate genomes are determined by their structural properties. *Genome Research*, *18*(10), 1545–1553. Online: https://doi.org/10.1101/gr.078303.108

Bagshaw, A. T. M. (2017). Functional mechanisms of microsatellite adn in eukaryotic genomes. *Genome Biology and Evolution*, *9*(9), 2428–2443. Online: https://doi.org/10.1093/gbe/evx164

Brooks, J., y Jefferson, K. (2014). Phase variation of poly-n-acetylglucosamine expression in staphylococcus aureus. *PLoS Pathogens*, *10*(7), e1004292. Online: https://doi.org/10.1371/journal.ppat.1004292

Crespo-Piazuelo, D., y Lawlor, P. G. (2021). Livestock-associated methicillin-resistant staphylococcus aureus (la-mrsa) prevalence in humans in close contact with animals and measures to reduce on-farm colonisation. *Irish Veterinary Journal*, *74*(1), 21. Online: https://doi.org/10.1186/s13620-021-00200-7

Dunyach-Remy, C., Ngba Essebe, C., Sotto, A., y Lavigne, J.-P. (2016). Staphylococcus aureus toxins and diabetic foot ulcers: Role in pathogenesis and interest in diagnosis. *Toxins*, *8*(7), 209. Online: https://doi.org/10.3390/toxins8070209

Essien, U. C., Boswihi, S. S., Agbakoba, N. R., y Udo, E. E. (2022). Description of methicillin-susceptible staphylococcus aureus clonal complex 30 related to the pandemic phage type 80/81 isolated from patients in three tertiary hospitals in jos, north central nigeria. *Medical Principles and Practice*, *31*, 269–275. Online: https://doi.org/10.1159/000524755

Gadgil, R. Y., Romer, E. J., Goodman, C. C., Rider, S. D., Damewood, F. J., Barthelemy, J. R., ... Leffak, M. (2020). Replication stress at microsatellites causes dna double-strand breaks and break-induced replication. *Journal of Biological Chemistry*, *295*(45), 15378–15397. Online: https://doi.org/10.1074/jbc.RA120.013495

George, A. N., Stewart, J. R., Evans, J. C., y Gibson, J. M. (2020). Risk of antibiotic-resistant staphylococcus aureus dispersion from hog farms: A critical review. *Risk Analysis*, *40*(8), 1645–1665. Online: https://doi.org/10.1111/risa.13495

Gherardi, G. (2023). Staphylococcus aureus infection: Pathogenesis and antimicrobial resistance. *International Journal of Molecular Sciences*,

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

24(9), 8182. Online: https://doi.org/10.3390/ijms24098182

Gladding, T. L., Rolph, C. A., Gwyther, C. L., Kinnersley, R., Walsh, K., y Tyrrel, S. (2020). Concentration and composition of bioaerosol emissions from intensive farms: Pig and poultry livestock. *Journal of Environmental Management*, *272*, 111052. Online: https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111052

Gor, V., Ohniwa, R., y Morikawa, K. (2021). No change, no life? what we know about phase variation in staphylococcus aureus. *Microorganisms*, *9*(2), 244. Online: https://doi.org/10.3390/microorganisms9020244

Guillén, R., Salinas, C., Mendoza-Álvarez, A., Rubio Rodríguez, L. A., Díaz-de Usera, A., Lorenzo-Salazar, J. M., … Rodríguez, F. (2024). Genomic epidemiology of the primary methicillin-resistant staphylococcus aureus clones causing invasive infections in paraguayan children. *Microbiology Spectrum*, *12*(2), e03012-23. Online: https://doi.org/10.1128/spectrum.03012-23

Harhay, G., Harhay, D., Bono, J., Capik, S., Dedonder, K., Apley, M., … Smith, T. (2019). A computational method to quantify the effects of slipped strand mispairing on bacterial tetranucleotide repeats. *Scientific Reports*, *9*, 17192. Online: https://doi.org/10.1038/s41598-019-53866-z

Heaton, C. J., Gerbig, G. R., Sensius, L. D., Patel, V., y Smith, T. C. (2020). Staphylococcus aureus epidemiology in wildlife: A systematic review. *Antibiotics*, *9*(2), 89. Online: https://doi.org/10.3390/antibiotics9020089

Holden, M. T. G., Feil, E. J., Lindsay, J. A., Peacock, S. J., Day, N. P. J., Enright, M. C., … Parkhill, J. (2004). Complete genomes of two clinical staphylococcus aureus strains: Evidence for the rapid evolution of virulence and drug resistance. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *101*(26), 9786–9791. Online: https://doi.org/10.1073/pnas.0402521101

Idrees, M., Sawant, S., Karodia, N., y Rahman, A. (2021). Staphylococcus aureus biofilm: Morphology, genetics, pathogenesis and treatment strategies. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *18*(14), 7602. Online: https://doi.org/10.3390/ijerph18147602

Kwiecinski, J. M., y Horswill, A. R. (2020). Staphylococcus aureus bloodstream infections: pathogenesis and regulatory mechanisms. *Current Opinion in Microbiology*, *53*, 51–60. Online: https://doi.org/10.1016/j.mib.2020.02.005

Larkin, E., Carman, R., Krakauer, T., y Stiles, B. (2009). Staphylococcus aureus: The toxic presence of a pathogen extraordinaire. *Current Medicinal Chemistry*, *16*(30), 4003–4019. Online: https://doi.org/10.2174/092986709789352321

Martin, P., Makepeace, K., Hill, S. A., Hood, D. W., y Moxon, E. R. (2005). Microsatellite instability regulates transcription factor binding and gene expression. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *102*(10), 3800–3804. Online: https://doi.org/10.1073/pnas.0406805102

Metzgar, D., Liu, L., Hansen, C., Dybvig, K., y Wills, C. (2002). Domain-level differences in microsatellite distribution and content result from different relative rates of insertion and deletion mutations. *Genome Research*, *12*(3), 408–413. Online: https://doi.org/10.1101/gr.198602

Monecke, S., Akpaka, P. E., Smith, M. R., Unakal, C. G., Thoms Rodriguez, C.-A., Ashraph, K., … Ehricht, R. (2023). Clonal complexes distribution of staphylococcus aureus isolates from clinical samples from the caribbean islands. *Antibiotics*, *12*(6), 1050. Online: https://doi.org/10.3390/antibiotics12061050

Narechania, A., Baker, R., DeSalle, R., Mathema, B., Kolokotronis, S.-O., Kreiswirth, B., y Planet, P. J. (2016). Clusterflock: a flocking algorithm for isolating congruent phylogenomic datasets. *GigaScience*, *5*(1), 43. Online: https://doi.org/10.1186/s13742-016-0152-3

Oliveira, D., Borges, A., y Simões, M. (2018). Staphylococcus aureus toxins and their molecular activity in infectious diseases. *Toxins*, *10*(6), 252. Online: https://doi.org/10.3390/toxins10060252

Pedersen, K., Nielsen, M. W., Fertner, M. E., Espinosa-Gongora, C., y Bækbo, P. (2024). Development of livestock-associated methicillin-resistant staphylococcus aureus (la-mrsa) loads in pigs and pig stables during the fattening period. *Veterinary Sciences*, *11*(11), 558. Online: https://doi.org/10.3390/vetsci11110558

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Ramirez, H. A., Pastar, I., Jozic, I., Stojadinovic, O., Stone, R. C., Ojeh, N., … Tomic-Canic, M. (2018). Staphylococcus aureus triggers induction of mir-15b-5p to diminish dna repair and deregulate inflammatory response in diabetic foot ulcers. *Journal of Investigative Dermatology*, *138*(5), 1187–1196. Online: https://doi.org/10.1016/j.jid.2017.11.038

Ramos, B., Rosalino, L. M., Palmeira, J. D., Torres, R. T., y Cunha, M. V. (2022). Antimicrobial resistance in commensal staphylococcus aureus from wild ungulates is driven by agricultural land cover and livestock farming. *Environmental Pollution*, *303*, 119116. Online: https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119116

Rios-Willars, E., y Chirinos-Arias, M. C. (2024). Mfind: a tool for dna barcode analysis in angiosperms and its relationship with microsatellites using a sliding window algorithm. *Planta*, *259*(6), 134. Online: https://doi.org/10.1007/s00425-024-04420-3

Saeed, A. F., Wang, R., y Wang, S. (2016). Microsatellites in pursuit of microbial genome evolution. *Frontiers in Microbiology*, *6*, 1462. Online: https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.01462

Sayers, E. W., Beck, J., Bolton, E. E., Brister, J. R., Chan, J., Connor, R., … Pruitt, K. D. (2025). Database resources of the national center for biotechnology information in 2025. *Nucleic Acids Research*, *53*(D1), D20–D29. Online: https://doi.org/10.1093/nar/gkae979

Sayhood, M. H., Mohammed, A. L., Abdulhameed, M. F., y Jori, M. M. (2022). Classical and molecular identification of staphylococcus aureus isolated from infestation cattle wounds with myiasis in basrah governorate, iraq. *Iraqi Journal of Veterinary Sciences*, *36*(3), 641–646. Online: https://doi.org/10.33899/ijvs.2021.131196.1930

Shettigar, K., y Murali, T. S. (2020). Virulence factors and clonal diversity of staphylococcus aureus in colonization and wound infection with emphasis on diabetic foot infection. *European Journal of Clinical Microbiology & Infectious Diseases*, *39*(12), 2235–2246. Online: https://doi.org/10.1007/s10096-020-03984-8

Song, X., Yang, T., Zhang, X., Yuan, Y., Yan, X., Wei, Y., … Zhou, C. (2021). Comparison of the microsatellite distribution patterns in the genomes of euarchontoglires at the taxonomic level. *Frontiers in Genetics*, *12*, 622724. Online: https://doi.org/10.3389/fgene.2021.622724

Srivastava, D., Ahmad, M. M., Shamim, M., Maurya, R., Srivastava, N., Pandey, P., … Siddiqui, M. H. (2019). Modulation of gene expression by microsatellites in microbes. En *New and future developments in microbial biotechnology and bioengineering* (pp. 209–218). Elsevier. Online: https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63503-7.00012-7

Tatusova, T., Ciufo, S., Fedorov, B., O'Neill, K., y Tolstoy, I. (2015). Refseq microbial genomes database: new representation and annotation strategy. *Nucleic Acids Research*, *43*(7), 3872–3872. Online: https://doi.org/10.1093/nar/gkv278

Timsit, Y., y Várnai, P. (2010). Helical chirality: a link between local interactions and global topology in dna. *PLoS ONE*, *5*(2), e9326. Online: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0009326

Tong, S. Y. C., Davis, J. S., Eichenberger, E., Holland, T. L., y Fowler, V. G. (2015). Staphylococcus aureus infections: Epidemiology, pathophysiology, clinical manifestations, and management. *Clinical Microbiology Reviews*, *28*(3), 603–661. Online: https://doi.org/10.1128/CMR.00134-14

Vayssières, M., Marechal, N., Yun, L., Lopez Duran, B., Murugasamy, N. K., Fogg, J. M., … Lamour, V. (2024). Structural basis of dna crossover capture by escherichia coli dna gyrase. *Science*, *384*(6692), 227–232. Online: https://doi.org/10.1126/science.adl5899

Wang, Y., Zhang, P., Wu, J., Chen, S., Jin, Y., Long, J., … Yang, H. (2023). Transmission of livestock-associated methicillin-resistant staphylococcus aureus between animals, environment, and humans in the farm. *Environmental Science and Pollution Research*, *30*(37), 86521–86539. Online: https://doi.org/10.1007/s11356-023-28532-7

Winogradoff, D., Li, P., Joshi, H., Quednau, L., Maffeo, C., y Aksimentiev, A. (2021). Chiral systems made from dna. *Advanced Science*, *8*(5), 2003113. Online: https://doi.org/10.1002/advs.202003113

Wu, Y., Chen, T., Wang, Y., Huang, M., Wang, Y., y Luo, Z. (2023). New insight into the virulence and inflammatory response of staphylococcus

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

aureus strains isolated from diabetic foot ulcers. *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology*, *13*, 1234994. Online: https://doi.org/10.3389/fcimb.2023.1234994

Yu, S., Xie, Y., Jiao, Y., Li, N., y Ding, B. (2025). Nucleic acid-based chiral nanostructures and their biomedical applications. *Nanoscale Horizons*, *10*(9), 1802–1814. Online: https://doi.org/10.1039/D5NH00140D

Zhou, K., Aertsen, A., y Michiels, C. (2014). The role of variable dna tandem repeats in bacterial adaptation. *FEMS Microbiology Reviews*, *38*(1), 119–141. Online: https://doi.org/10.1111/1574-6976.12036

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

La Granja: Revista de Ciencias de la Vida
pISSN:1390-3799; eISSN:1390-8596
https://doi.org/10.17163/lgr.n44.2026.04

Artículo científico / Scientific paper

Ciencias de la Tierra

Variabilidad hidrológica por cambio de cobertura de suelo en la cuenca del río Wawayme debido a actividades mineras, Ecuador

Hydrological variability due to changes in land cover in the Wawayme river basin caused by mining activities, Ecuador

Raúl Andrés Moreno Farfán[1] y María Z. Flores López[2]

[1]*Universidad Estatal Península de Santa Elena (UPSE), La Libertad, Santa Elena, Ecuador.* [https://ror.org/01k410495]
[2]*Universidad Autónoma de Baja California Sur, México.* [https://ror.org/01046sm89]

*Autor para correspondencia: rmoreno320@upse.edu.ec

Manuscrito recibido el 1 de febrero de 2025. Aceptado, tras revisión el 11 de diciembre de 2025. Publicado el 1 de septiembre de 2026.

Resumen

Este estudio evalúa los efectos hidrológicos derivados de cambios en el uso y cobertura del suelo en la cuenca del río Wawayme, Ecuador. La investigación se desarrolló mediante: 1) análisis multitemporal de cobertura vegetal entre 2013-2020 utilizando clasificación supervisada con el plug-in SCP en QGIS; y 2) modelación hidrológica comparativa de escenarios 2015-2020 empleando el modelo hidrológico distribuido TETIS. Los parámetros hidrológicos se estimaron a partir de datos meteorológicos, características del terreno y propiedades edáficas disponibles. Como resultado se obtuvo una disminución de áreas primariamente vegetadas de 14,35 % y un aumento de áreas primariamente no vegetales de 13,86 %; y un aumento del caudal y volumen simulado en la cuenca de 0,002 $m^3\ s^{-1}$ y 0,196 Hm^3 respectivamente, evidenciando una variabilidad en el comportamiento hidrológico de la cuenca. La limitada disponibilidad de datos meteorológicos e hidrológicos constituye un desafío recurrente en la región. No obstante, la metodología aplicada resalta la importancia de monitorear y gestionar de manera adecuada los recursos hídricos en zonas con actividades extractivas. Este estudio subraya la necesidad de implementar medidas de mitigación y conservación que minimicen los impactos ambientales y favorezcan la resiliencia de las comunidades locales.

Palabras clave: Cobertura y uso del suelo, modelación hidrológica, cuenca hidrográfica, minería, ambiente.

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Abstract

This study evaluates the hydrological effects resulting from changes in land use and land cover in the Wawayme River basin, Ecuador. The research was conducted through: 1) multitemporal analysis of vegetation cover between 2013 and 2020, using supervised classification with the SCP plugin in QGIS; and 2) comparative hydrological modeling of scenarios for 2015–2020, using the TETIS distributed hydrological model. Hydrological parameters were estimated based on available meteorological data, terrain characteristics, and edaphic properties. As a result, we obtained a decrease of 14.35% in primary vegetated areas and an increase of 13.86% in primary non-vegetated areas; and an increase in simulated flow and volume in the basin of 0.002 m^3 s^{-1} and 0.196 Hm^3, respectively, evidencing a variability in the hydrological behavior of the basin. The limited availability of meteorological and hydrological data is a recurrent challenge in the region. However, the applied methodology highlights the importance of monitoring and managing water resources in areas with extractive activities. This study underlines the need to implement mitigation and conservation measures that minimize environmental impacts and favor the resilience of local communities.

Keywords: Land cover and land use, hydrologic modeling, watershed, mining, environment.

Forma sugerida de citar: Moreno, R. y Flores, M. (2026). Variabilidad hidrológica por cambio de cobertura de suelo en la cuenca del río Wawayme debido a actividades mineras, Ecuador. *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida.* Vol. 44(2):60-79. https://doi.org/10.17163/lgr.n44.2026.04.

Orcid IDs:

Raúl Andrés Moreno Farfán: https://orcid.org/0000-0001-8194-8386
María Z. Flores López: https://orcid.org/0000-0002-8446-9951

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

1 Introducción

El ciclo hidrológico global enfrenta modificaciones significativas debido a alteraciones en los ecosistemas terrestres. A nivel mundial, las cuencas hidrográficas experimentan crecientes problemas de disponibilidad hídrica como consecuencia de la degradación de sus condiciones naturales, siendo la explotación desmesurada de los recursos naturales, el cambio de cobertura del suelo y cambio climático, los causantes de disminuir la cantidad y disponibilidad del recurso hídrico, pudiendo generar mayores eventos de crecidas y un aumento del estrés hídrico (Angulo y Saavedra, 2018). Por otra parte, es difícil pensar en una actividad humana sobre el territorio que no implique mover tierra o realizar cambios sobre las primeras capas del suelo, reemplazando ecosistemas que una vez contribuyeron a generar suelos fértiles con otros que no lo hacen (Daily y Ehrlich, 1992).

Esta transformación ecosistémica tiene particular relevancia en regiones con alta biodiversidad y fragilidad ambiental, como es el caso de la Amazonía, donde la alteración de la cobertura vegetal puede tener impactos significativos en los regímenes hídricos regionales y locales (Nobre y cols., 2016). Estudios recientes demuestran que la modificación de coberturas naturales a áreas antropizadas puede alterar significativamente los patrones de escorrentía, infiltración y evapotranspiración, generando desequilibrios en el comportamiento hidrológico de las cuencas (Siswanto y Francés, 2019; Fang y Fan, 2021).

Bajo este contexto, es conocido que el desarrollo económico de un país lleva consigo la realización de algunas actividades económicas como la explotación de recursos no renovables, por ejemplo, la minería; en este ámbito podemos señalar que Ecuador ascendió un 26 % como destino minero (Ministerio de Energía y Minas, 2022), donde nuevas estrategias y normas regulatorias, han resultado en un cambio de estrategia para una nación que tradicionalmente ha basado su economía en exportaciones petroleras y agrícolas. Destacando los grandes proyectos mineros como Mirador y Fruta del Norte actualmente en fase de explotación y eventualmente lo harán Loma Larga, Curipamba, La Plata y Cascabel, entre otros (Moreno Farfán, 2022).

Aunque todo lo anteriormente expuesto es correcto en términos del desarrollo económico, hay que tener en cuenta que la minería ha generado situaciones problemáticas en su entorno debido a sus impactos propios (Vásconez y Torres, 2018). Los grandes proyectos extractivos no han estado exentos de controversias, siendo cuestionados por el no respeto a los derechos humanos y de la naturaleza (Angelo y Sempere, 2018). Además, adquiere especial relevancia la ubicación de estos proyectos en ecosistemas de alto valor ecológico, y de gran diversidad biológica (por ejemplo, la región amazónica ecuatoriana), donde una inadecuada planificación y sobreexplotación de los recursos naturales pueden generar graves alteraciones e impactos sobre la zona, en especial sobre el recurso hídrico.

Por otro lado, en las últimas décadas la exacerbada degradación del suelo, causada por las actividades de origen antrópico han alterado gravemente la superficie terrestre (de Jong y cols., 2021), donde cerca de tres cuartas partes de esta ha sido modificada en el último milenio. Ahora, en la actualidad se habla mucho de abordar con éxito los retos de la sostenibilidad global, como: 1) la lucha contra el cambio climático, 2) la pérdida de la biodiversidad y 3) la soberanía alimentaria, los cuales dependen directamente del cambio en el uso y la cobertura del suelo, donde una inadecuada práctica sobre este recurso afectará en gran medida a las fuentes y sumideros de carbono, provocará la pérdida de hábitats y no será capaz de sostener de manera adecuada la producción de alimentos (Winkler y cols., 2021).

Por consiguiente, actividades económicas como la agricultura y la explotación petrolera y minera son las principales causantes de la deforestación en la Amazonía ecuatoriana, provocando pérdidas en la biodiversidad y tala indiscriminada de bosque que bordeó las 50,000 ha $año^{-1}$ y la degradación constante de los suelos (Custode y Sourdat, 1986; Bustamante y cols., 1993; Giraldo y cols., 2013). Por ejemplo, en Ecuador el sector agropecuario y de silvicultura se expandieron en un 45 % en 37 años, mientras que las áreas transformadas por minería superaron las 7 mil ha al 2021 (Paz, 2024). Según menciona el Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP), 2018) las pérdidas de suelo en el país varían entre 30 y 50 t ha^{-1} $año^{-1}$ en áreas de estribaciones con pendien-

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

tes superiores al 25%. En zonas con pendientes que varían entre 12 y 25%, la erosión está comprendida entre 10 y 30 t ha^{-1} $año^{-1}$ y en suelos con pendientes menores al 12% la erosión se estima entre 5 y 10 t ha^{-1} $año^{-1}$ (mayor parte de la región Amazónica del Ecuador) (Suquilanda, 2008).

Ahora bien, antes de inmiscuirnos en la relevancia que tiene el uso y cobertura del suelo dentro del régimen hídrico, primeramente, partimos de la definición de cobertura de suelo (en inglés: *land cover*) que hace referencia a la cobertura biofísica que se observa sobre la superficie de la tierra, término enfocado a la descripción de la vegetación y elementos hechos por el hombre (antropogénicos). El uso de suelo (en inglés: *land use*), está caracterizado por los arreglos, actividades y entradas que el hombre emprende en una cierta cobertura de suelo para producir, cambiarla o mantenerla (FAO, 2005).

Siendo necesario indicar, que en poco tiempo el medio ambiente se ha visto gravemente afectado a escala global por los cambios en el uso y cobertura del suelo, convirtiéndose en un tema relevante y de interés para muchos investigadores a nivel mundial, ya que estos cambios suponen una amenaza significativa para la sostenibilidad de las cuencas hidrográficas, ya que se relaciona directamente a la exacerbación del aumento del estrés hídrico, la frecuencia de eventos de crecida (influencia en el suministro de agua a nivel de cuenca, donde, la deforestación tiende a aumentar el caudal de los cauces naturales debido a la disminución de la evapotranspiración), y cambios en las tasas de erosión y generación de sedimentos (Angulo y Saavedra, 2018; Siswanto y Francés, 2019).

Asimismo, Dingman (2014) menciona que la vegetación es un agente concluyente del ciclo hidrológico, ya que, condiciona tanto la evapotranspiración, la infiltración y la escorrentía como la interceptación y la transpiración del agua. Siendo la cubierta vegetal uno de los principales partícipes (conjuntamente con la precipitación, la topografía, entre otros) de la recarga hídrica de los suelos y la formación de escorrentía, ya que interviene de manera directa sobre: 1) la tasa de precipitación neta registrada en la superficie del suelo; 2) las tasas de infiltración del suelo; 3) la redistribución de la humedad de este componente; y 4) en las pérdidas por evapotranspiración (Pascual, 2002).

Pues bien, la vegetación, introduce un subciclo de doble dirección, debido a: 1) interfiere en el flujo descendente de la precipitación hacia la superficie, debido a pérdidas por evaporación que modifican la redistribución de la lluvia trascolada, en función de la capacidad de infiltración del suelo. Y, 2) aporta a las pérdidas por transpiración al utilizar el agua almacenada en las capas del suelo (flujo ascendente) que posteriormente se liberará a la atmósfera como vapor de agua (Pascual, 2002).

En síntesis, podemos indicar que: 1) la vegetación actúa de manera directa en el ciclo del agua, en especial en la mecánica de las superficies de almacenamiento del sistema, ya que, está directamente en contacto con la atmósfera y asociada con los suelos; y 2) como un sistema biológico, consumidor de agua, la cual, es necesaria para cumplir con sus funciones vitales, denominado por Barceló Coll y cols. (2000) como el sistema suelo – vegetación – atmósfera (Pascual, 2002).

Por otra parte, en relación a la importancia de los bosques (suelo forestal y cobertura arbolada) en el ciclo del agua, según Mintegui Aguirre y Robredo Sánchez (2008) estos condicionan el movimiento del agua dentro de la cuenca, ya que, regulan su velocidad de escorrentía e incrementan su infiltración, además de intervenir directamente en el componente horizontal del ciclo del agua (transpiración), y su intervención con las precipitaciones, interceptándolas con su cubierta aérea cuando se trata de precipitaciones verticales, y cediendo la misma para facilitarla en ella la formación de precipitaciones horizontales (condensaciones y formación de nieblas).

Además, Mintegui Aguirre y Robredo Sánchez (1994) mencionan que: 1) la cubierta vegetal representa un factor estabilizador de la cuenca ante los episodios extraordinarios de lluvia, amortiguando los efectos geotorrenciales que se desencadenan a nivel de cuenca, siendo de esta manera un regulador natural de los recursos hídricos. 2) Favorece la estabilidad biológica y los procesos de regeneración de los ecosistemas, teniendo de esta manera un rol conservador. Y 3) finalmente previene la pérdida de suelo disminuyendo el impacto de los distintos tipos de procesos erosivos.

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

En este sentido, los suelos con una cobertura vegetal desarrollada, mantienen un nivel suficiente de materia orgánica que favorece su estructura, aumentando de esta manera su capacidad de infiltración. Donde las raíces de las especies forestales presentan un medio preferente que genera una mayor capacidad de infiltración frente a suelos agrícolas, representando un mayor aporte a la fracción de escorrentía subterránea (Prats y cols., 2011).

Así pues, según la FAO actualmente se presenta una tasa de deforestación de 10 millones de ha de bosques entre 2015 y 2020 y según los datos más actualizados del Ministerio de Ambiente, Agua y Transición Ecológica del Ecuador que corresponden al año 2018, nos indican que cada año se pierde un promedio de 94,353 ha de bosque en el país, cifra considerable si la comparamos con otros países de la región (Montaño, 2021).

Donde, históricamente los cambios en el uso del suelo en la Amazonía se han debido a la creciente demanda de productos agrícolas y recursos no renovables (Nobre y cols., 2016), no siendo la excepción Ecuador donde estas actividades han sido las promotoras de la deforestación y de una degradación y pérdida constante de los suelos (Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP), 2018).

Por lo antes expuesto, el presente estudio pretende determinar la variabilidad en el balance hidrológico derivado de un cambio en el uso y cobertura del suelo sobre la cuenca hidrográfica del río Wawayme (Figura 1), provincia de Zamora Chinchipe – Ecuador; mediante el análisis geoespacial (plug-in SCP y su método de pos procesamiento) y la modelación hidrológica (software TETIS). Los objetivos específicos incluyen: 1) cuantificar el cambio de cobertura vegetal entre 2013 y 2020 mediante técnicas de teledetección; 2) implementar un modelo hidrológico que permita simular escenarios comparativos; y 3) evaluar los cambios en los regímenes hidrológicos asociados a las alteraciones de cobertura vegetal identificadas.

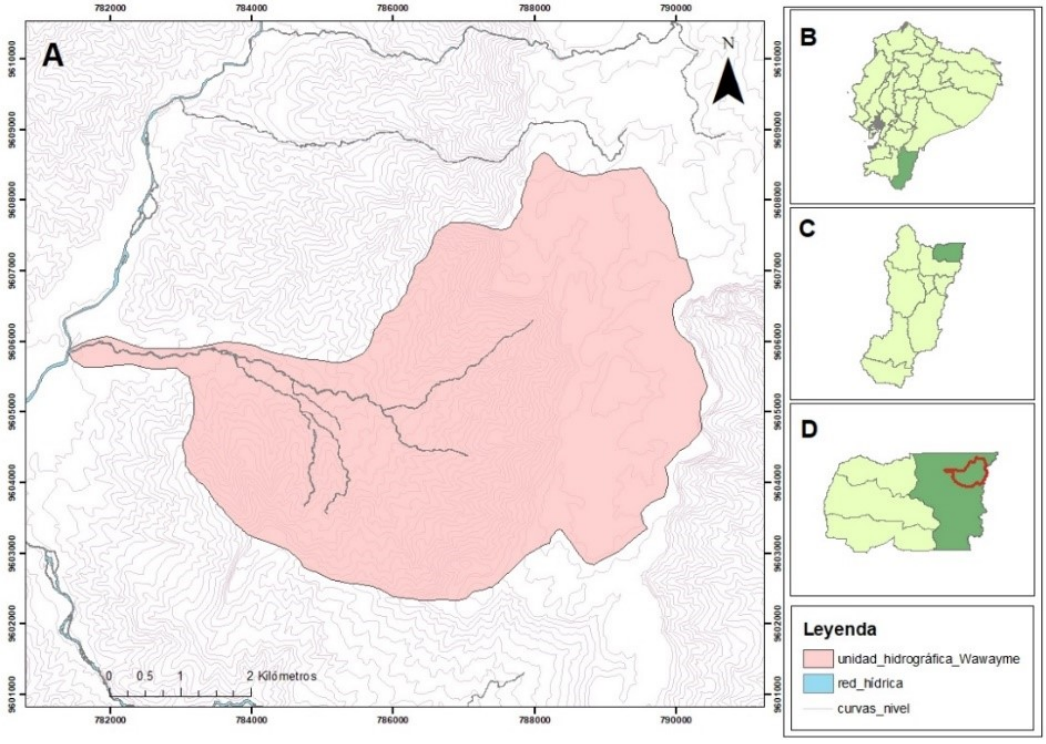


Figura 1. A (ubicación de la cuenca hidrográfica del río Wawayme), B (ubicación de la provincia de Zamora Chinchipe en la República del Ecuador), C (ubicación del cantón El Pangui en la provincia de Zamora Chinchipe) y D (ubicación de la cuenca hidrográfica en la parroquia Tundayme, cantón El Pangui).

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

2 Materiales y Métodos

El presente estudio adopta un enfoque metodológico que integra técnicas de análisis geoespacial y modelación hidrológica. La metodología se estructura en tres componentes principales. El primero aborda: 1) la caracterización climática y de cuenca hidrográfica sobre la zona de estudio, 2) las operaciones iniciales y metodología empleada para la clasificación de las imágenes satelitales, y 3) finalmente la estimación de los parámetros de TETIS, necesarios para la corrida del modelo hidrológico.

2.1 Caracterización climática y de cuenca hidrográfica

Previamente, se consideró importante realizar la caracterización climática del área de estudio, identificando tendencias climáticas y eventos extremos, con base en la información registrada de dos estaciones meteorológicas convencionales ubicadas cerca de la zona de estudio, operadas por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI). Indicando que estas dos últimas no están ubicadas dentro de la cuenca de estudio, pero son las más cercanas (60 km aproximadamente en línea recta), además que poseen una mayor cantidad de información a escala temporal.

La información pluviométrica recopilada se procesó en función de la escala temporal disponible (meses comprendidos entre 1990 y 2017), obteniendo valores de Precipitación Media Mensual para cada estación en los periodos disponibles. Teniendo un régimen de precipitaciones del tipo bimodal con picos máximos entre los meses de marzo a julio, siendo la precipitación menor el resto del año.

Ahora, analizándolo las precipitaciones máximas en 24 horas y la máxima promedio de cada periodo, se identificaron varios años en los cuales se supera el promedio (Figura 2), lo cual da a entender que la zona ha presentado eventos de crecida, los cuales podrían repetirse en períodos futuros. Por otro lado, el estudio de temperaturas evidencia, una temperatura media anual de 23.2 °C, una temperatura máxima anual de 28.6 °C y una mínima anual de 18.11 °C, siendo los meses más calurosos de octubre a marzo. Por último, el análisis de ETP según Thornthwaite, arroja un valor promedio de 1,211.65 mm, siendo los meses de octubre a enero los que presentan valores mayores.

En relación a la caracterización de la cuenca hidrográfica del río Wawayme, parte de la obtención del Modelo Digital del Terreno (DEM) (resolución 30x30m) descargado del servidor Earth Data de la NASA (Figura 3), esto a través del software QGIS y su plug in SRTM DOWNLOADER; utilizando los Sistemas de Información Geográfica como herramienta de cálculo y procesamiento.

Los parámetros morfométricos de la cuenca evidencian características asociadas a una respuesta hidrológica moderadamente torrencial. En particular, los índices de forma (Kc = 1.43; Ff = 0.34) indican una tendencia a la generación de crecidas sostenidas, más que a respuestas abruptas. En términos de relieve, la pendiente media (S = 32.12%) y la altitud media (Hm = 1,648.22 m.s.n.m.) permiten clasificar la cuenca como de carácter montañoso, lo cual influye directamente en la dinámica de escorrentía y en los procesos erosivos. Por su parte, el sistema de drenaje presenta un orden de corrientes de 5 y un tiempo de concentración (tc = 25.12 min), lo que sugiere que la totalidad de la cuenca contribuye relativamente rápido al proceso de escorrentía, favoreciendo la ocurrencia de caudales máximos en eventos de precipitación intensa.

Finalmente, el análisis de la curva hipsométrica indica que la cuenca se encuentra en una fase de transición entre los estados juvenil y maduro. Este comportamiento se evidencia en la distribución altitudinal, donde aproximadamente el 35% del área se localiza por encima de los 1,900 m s.n.m., lo que sugiere la persistencia de procesos erosivos activos. Esta interpretación se refuerza mediante el histograma de frecuencias altimétricas, en el cual se observa que la mayor proporción del área de la cuenca se concentra en el rango altitudinal entre 1,900 y 2,080 m.s.n.m.

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

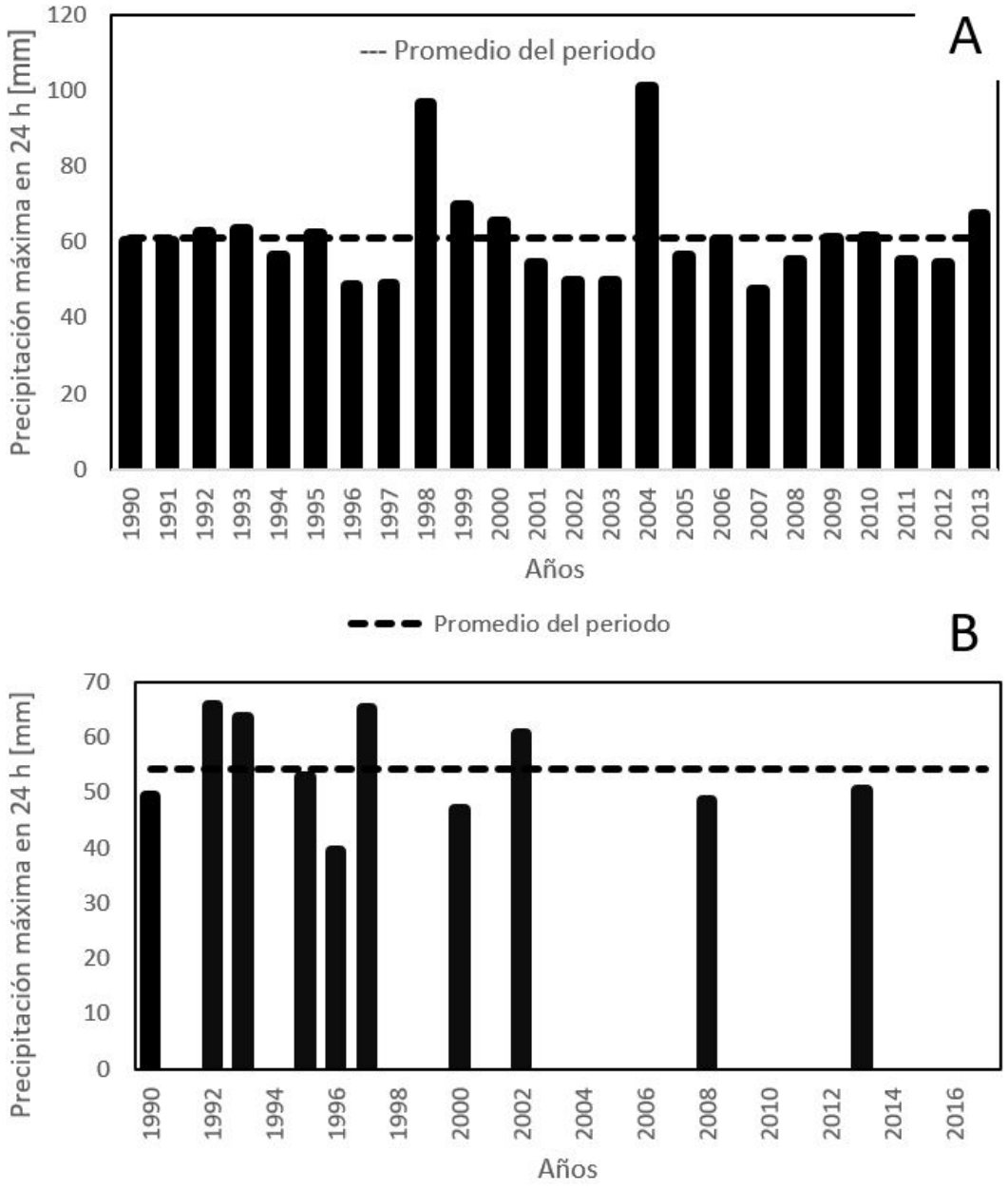


Figura 2. A (Precipitación máxima en 24 horas registrada anualmente en la estación Gualaquiza – INAMHI, para el período 1990–2013. La línea discontinua representa el promedio del período. Los años sin barra corresponden a períodos sin registro disponible por ausencia de datos en la base del INAMHI), B (Precipitación máxima en 24 horas registrada anualmente en la estación El Pangui – INAMHI, para el período 1990–2016. La línea discontinua representa el promedio del período. Los años 2006 y 2016 no presentan barra debido a la ausencia de datos registrados para dichos períodos).
Fuente: Elaboración propia.

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

2.2 Metodología de clasificación de imágenes

Para el análisis de los cambios en la cobertura vegetal, se empleó una metodología de clasificación supervisada utilizando el complemento Semi-Automatic Classification Plugin (SCP) en QGIS. Este enfoque permite identificar y cuantificar las transformaciones en la cobertura del suelo a partir de imágenes satelitales multitemporales. Primeramente se emplearon dos imágenes completas Landsat 8 con fecha 27 de abril de 2013 y 12 de septiembre de 2020 correspondientes a la parte sur del Ecuador y norte del Perú, las imágenes fueron descargadas del portal Earth Explorer del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés), las cuales cuentan con nueve bandas del sensor OLI (Operational Land Imager, en español: Sensor Operacional Terrestre) y dos bandas tomadas por el sensor TIRS (Thermal Infrared Sensor, en español: Sensor Termal Infrarrojo). Es relevante indicar que la imagen tiene un proceso L1T, lo que significa que el producto tiene una corrección radiométrica sistemática, además de estar ortorectificadas y corregidas por el relieve topográfico.

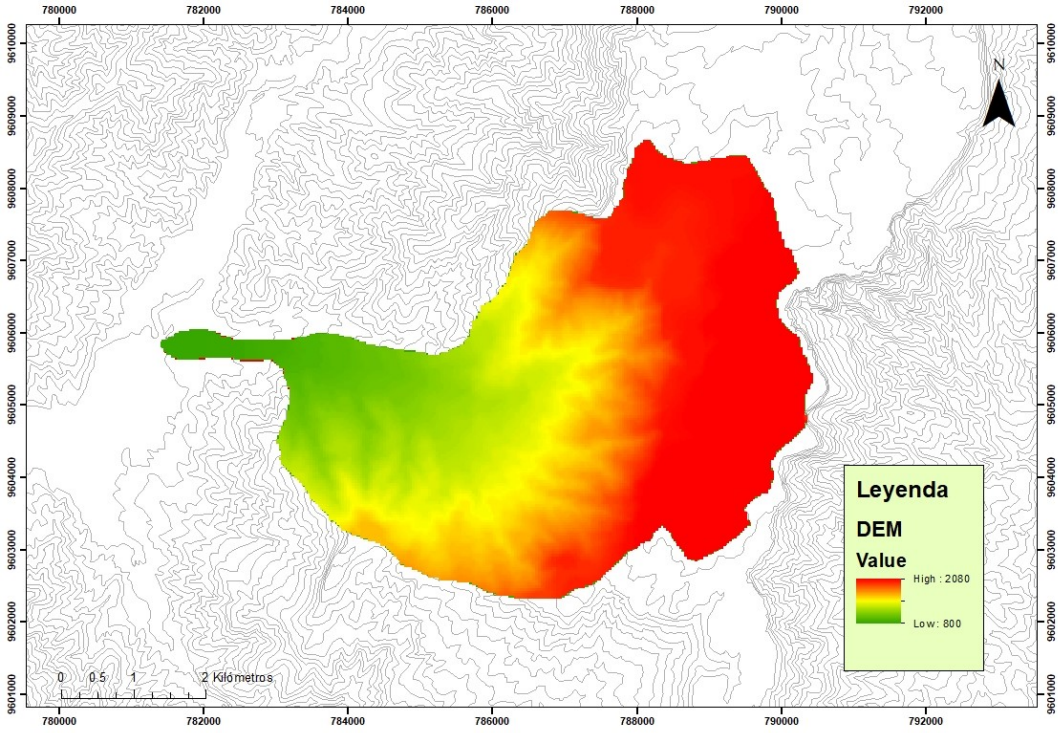


Figura 3. Elevación Digital del Terreno, cuenca del río Wawayme.

Posteriormente, utilizando la Clasificación Semiautomática de QGIS (SCP), mediante la combinación de bandas espectrales, se pudo cuantificar el cambio de cobertura de suelo en la zona de estudio, además de pretratamientos previos a la clasificación. Para el presente estudio se emplea el sistema de clasificación de la FAO (2005), que incluye distinciones en tres niveles (inicial, segundo y tercero), siendo relevante para este estudio el nivel inicial, el cual realiza una distinción dicotómica entre clasificadores para determinar la presencia o no de vegetación (Tabla 1).

2.3 Modelación hidrológica

Para evaluar la influencia de los cambios en la cobertura del suelo sobre la respuesta hidrológica, se implementó el modelo TETIS, un modelo conceptual distribuido que permite simular el comportamiento de cuencas bajo distintos escenarios de uso

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

del suelo. El proceso de modelación incluyó las etapas de parametrización, calibración y validación de resultados. El modelo TETIS, desarrollado por el Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente de la Universidad Politécnica de Valencia, corresponde a un modelo lluvia–escorrentía de tipo tanque que mantiene el balance hídrico en cada una de las celdas del sistema. Su estructura permite representar de manera integrada procesos hidrológicos como la intercepción, almacenamiento superficial, infiltración, evapotranspiración, percolación y recarga de acuíferos, entre otros (Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente (IIAMA), 2021). Además, este modelo puede aplicarse tanto en el análisis de eventos extremos, como crecidas y procesos erosivos, mediante discretizaciones temporales de minutos u horas, como en estudios de disponibilidad de recursos hídricos a escala diaria, lo que lo convierte en una herramienta versátil para la simulación hidrológica en cuencas.

Según menciona Barrientos y cols. (2020) el modelo es capaz de analizar los cambios en la escorrentía de cuencas considerando efectos derivados de la silvicultura intensiva y/o al cambio climático, mediante la simulación de distintos usos de suelos y escenarios climáticos, donde se concluye que la escorrentía puede ser influenciada, en gran medida, por la disminución de las lluvias y el aumento de la evapotranspiración.

En este sentido, como señala Rodríguez-Lloveras y cols. (2015) este método estima las tasas de escorrentía y producción de sedimentos en función a los cambios históricos en el uso del suelo y la vegetación, donde se concluye que la gestión y los usos del suelo resultaron ser un factor decisivo en el comportamiento hidrológico de una cuenca, donde cobra relevancia la erosión y el rendimiento de sedimentos. Además, es relevante señalar que una adecuada gestión del uso del suelo puede mitigar el impacto adverso del cambio climático sobre el ciclo hidrológico (Fang y Fan, 2021).

Asimismo, TETIS requiere de ciertos parámetros iniciales, los cuales se los pueden dividir en: 1) derivados del DEM (modelo de elevación digital del terreno, pendientes, direcciones de flujo, celdas acumuladas y velocidad de ladera); 2) derivados de las propiedades edáficas, hidrogeológicas y geomorfológicas (almacenamiento estático, capacidad de infiltración, capacidad de percolación, etc.; y 3) derivados del uso y cobertura del suelo.

Como primer fichero o mapa raster para la elaboración del modelo hidrológico, partimos del Modelo de Elevación Digital (*Digital Elevation Model* o DEM por sus siglas en inglés). Para el presente estudio se empleó el DEM (resolución 30x30) previamente descargado del servidor Earth Explorer de la NASA (Figura 3). Es necesario mencionar que posterior a su obtención se rellenaron las imperfecciones existentes en la superficie del DEM por medio de la herramienta *Fill sinks*. A partir de este parámetro, se obtuvieron los ficheros de pendientes, direcciones de flujo, celdas acumuladas, velocidad de ladera.

Ahora, los parámetros derivados de las propiedades edáficas, hidrogeológicas y geomorfológicas, como: 1) el almacenamiento estático, que hace referencia al agua que transita por la cuenca y que se pierde por evapotranspiración (no forma parte de la escorrentía); 2) capacidad de infiltración, proceso de entrada al suelo a través de su superficie, y que se encuentra en función de los distintos tipos de suelos presentes en una cuenca); 3) capacidad de percolación, que hace referencia al flujo descendente de agua en el suelo hacia el acuífero a través de la zona no saturada, asociado al tipo de subsuelo y su estructura (características geológicas y geomorfológicas de las capas inferiores del suelo). Se estimaron, en función de la altitud (relación empírica), es decir, por ejemplo, para el almacenamiento estático, para una altitud de 5.000 m.s.n.m. se tiene un valor referencial de almacenamiento estático de 200 mm, y a unos 2.000 m.s.n.m., tenemos aproximadamente unos 350 mm. Esto al no contar con información observada para la cuenca de estudio, y optando por seguir la metodología utilizada por Terán (2017).

El fichero correspondiente a la cobertura del suelo, parte de evaluar la información obtenida de la base de datos geopedológica del proyecto "Levantamiento de Cartografía Temática a Escala 1:25.000, Lotes 1 y 2" ejecutado por el Ministerio de Ganadería y Agricultura (MAG), a través de la Unidad Ejecutora MAGAP-PRAT, dentro del programa denominado como SIGTIERRAS del año 2015 (Figura 4, A) y de la imagen Landsat 8 con fecha del 12 de septiembre de 2020 (Figura 4, B). Teniendo de esta manera cuatro tipos de cobertura de suelo presen-

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

tes en la cuenca, los cuales son: 1) bosque nativo; 2) vegetación arbustiva; 3) pastizales y 4) infraestructura antrópica.

Tabla 1. Fichero correspondiente a la variación mensual de evapotranspiración en cuatro coberturas vegetales.

Código	Uso de suelo	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Intercepción
1	Bosque nativo	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	4.00
2	Vegetación arbustiva	0.70	0.70	0.75	0.88	0.98	0.95	0.75	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.00
3	Pastizales	0.40	0.40	0.50	0.75	0.95	0.90	0.50	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	5.00
4	Infraestructura antrópica	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	1.00

Ahora, otro fichero requerido por el modelo TETIS es el referido a la variación temporal de la evapotranspiración, el cual, incluye la variación mes a mes de cada una de las coberturas vegetales que se presentan en la cuenca, el mismo consta de trece columnas, a modo explicativo podemos señalar que en la primera columna se encuentran los valores del mes de enero y en la doceava columna los de diciembre, y cada fila corresponde al tipo de cobertura vegetal identificada para la cuenca.

En lo referido al fichero del evento, este input hace referencia a la información de precipitación, evaporación y aforos, que representa un evento de lluvia en un tiempo determinado, para el presente estudio se consideró la información mensual derivada de las estaciones meteorológicas e hidrológicas detalladas en el apartado correspondiente a la caracterización climática y de la cuenca hidrográfica en el periodo comprendido entre febrero de 2012 hasta junio de 2015.

Por último, dentro del proceso de modelación es necesario realizar una calibración (emplea los ficheros de datos descritos anteriormente), la cual, pretende una mejor aproximación a la realidad al variar y combinar parámetros. En este apartado se buscó obtener valores adecuados para cada criterio (RMSE y Nash-Sutcliffe) además, de tener un mejor ajuste entre los picos máximos del hidrograma.

3 Resultados y discusión

Esta sección muestra los resultados de: 1) evaluar el cambio de cobertura de suelo para la cuenca hidrográfica del río Wawayme y 2) la modelación hidrológica donde se obtienen los caudales observados y simulados en función de los cambios de uso y cobertura de suelo, y 3) finalmente la discusión del presente estudio.

3.1 Resultados de evaluar el cambio de cobertura de suelo

Partimos de realizar dos clasificaciones en base a imágenes satelitales correspondientes a los años 2013 y 2020, teniendo como imagen de referencia la clasificación de 2013 y como nueva clasificación la imagen del 2020, esto mediante el plug-in SCP y su método de post procesamiento (cobertura de suelo), lo cual permitió calcular el número de píxeles que cambia de una clase a otra, teniendo una disminución de áreas primariamente vegetadas (APV) de 28,43 km^2 en 2013 a 24,34 km^2 en 2020, lo que significa que se perdido un 14,35 %, y un aumento de las áreas primariamente no vegetales (APNV) de 1 km^2 en 2013 a 5.08 km^2 en 2020 equivalente a un aumento del 13,86 % (Tabla 2, Figura 5).

Adicionalmente, en la Figura 7, se muestra una comparación multitemporal que evidencia de una manera más clara el cambio de uso y cobertura del suelo suscitado en la cuenca.

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

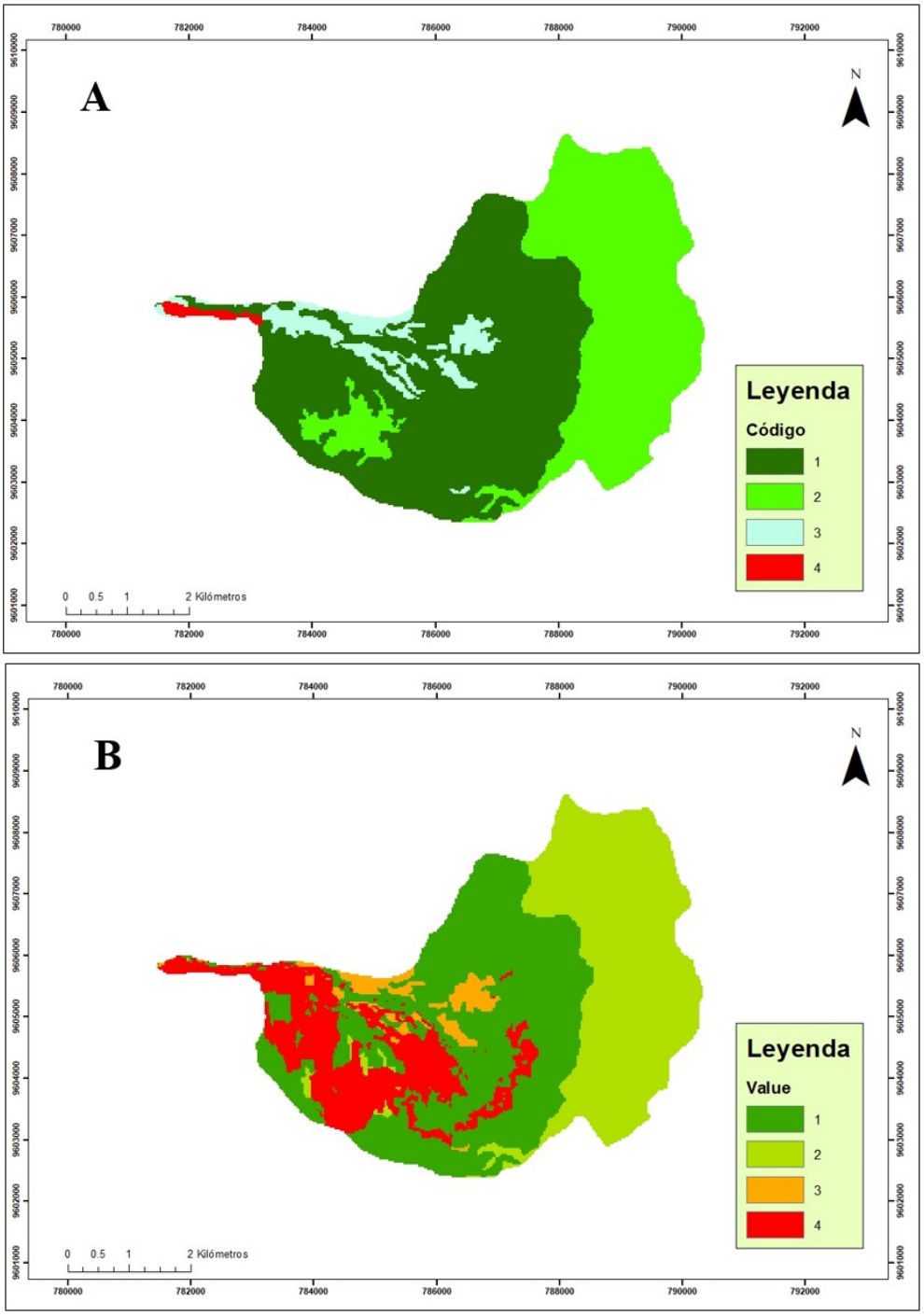


Figura 4. A (Mapa de cobertura de suelo correspondiente al año 2015, obtenido a partir de la base de datos geopedológica del proyecto SIGTIERRAS – MAG, 2015). B (Mapa de cobertura de suelo correspondiente al año 2020, obtenido mediante clasificación supervisada de imagen Landsat 8). En ambos mapas, los colores representan los siguientes tipos de cobertura: código 1 (verde oscuro) = bosque nativo; código 2 (verde claro) = vegetación arbustiva; código 3 (naranja/celeste) = pastizales; código 4 (rojo) = infraestructura antrópica. Al no contar con valores mensuales para el factor de vegetación, se tomaron valores de coberturas vegetales similares según la metodología de la FAO y del estudio realizado por Tejada Espinoza (2016) en la implementación del modelo TETIS en la cuenca del barranco del Carraixet (Tabla 1).

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

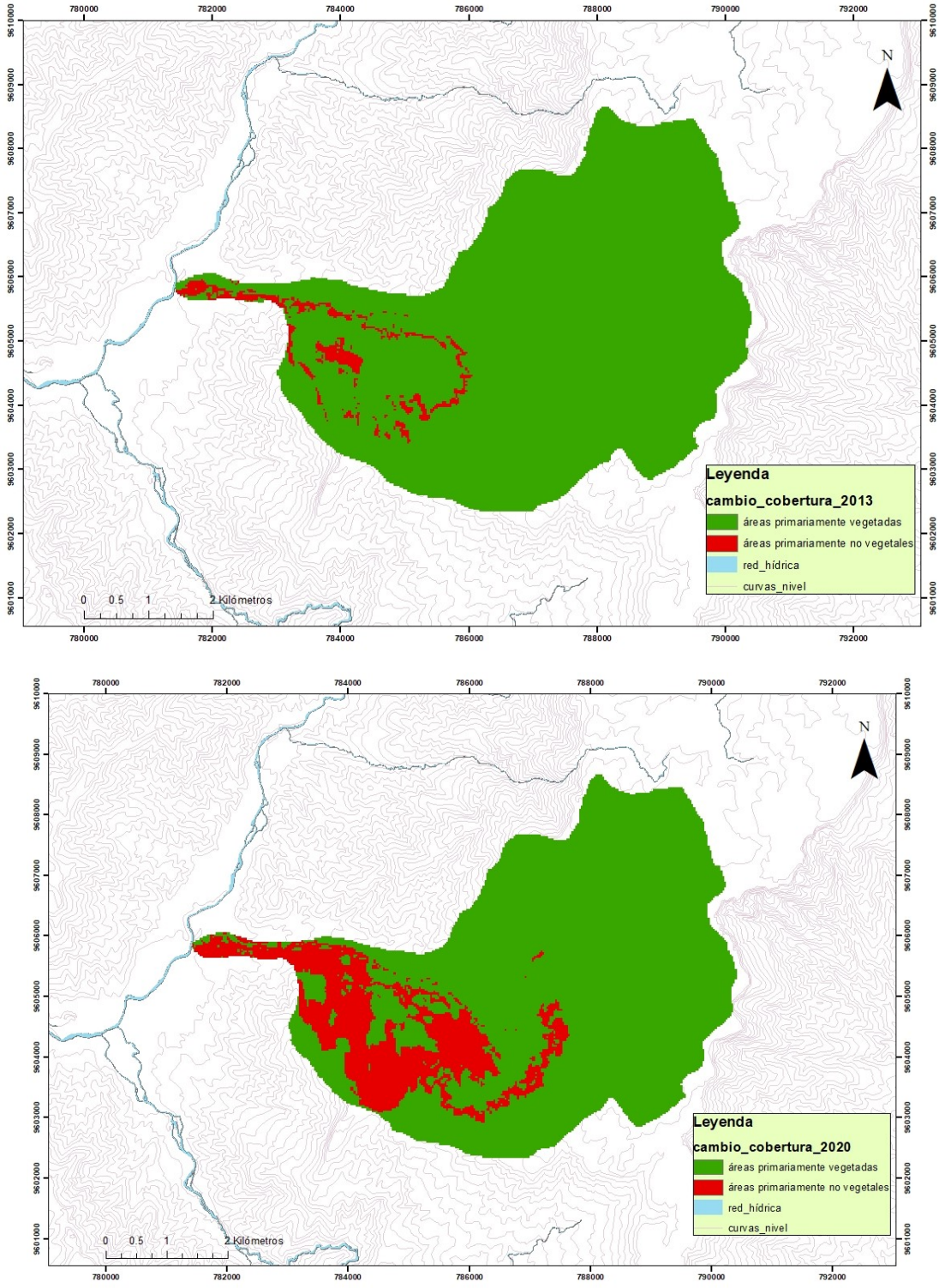


Figura 5. Clasificación de cobertura de suelo, años 2013 y 2020.

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Tabla 2. Análisis de cambio y cobertura de suelo, cuenca hidrográfica del río Wawayme, años 2013 y 2020

Nueva \ Referencia	Áreas primariamente vegetadas (APV)	Áreas primariamente no vegetales (APNV)	TOTAL 2013
Áreas primariamente vegetadas (APV)	24.21	4.22	28.43
Áreas primariamente no vegetales (APNV)	0.14	0.86	1.00
TOTAL 2020	24.34	5.08	29.42

El análisis de los cambios de cobertura muestra una transformación significativa del paisaje, donde las áreas con vegetación nativa están siendo reemplazadas principalmente por infraestructura minera y áreas degradadas. Esta transición representa un patrón preocupante desde la perspectiva ecológica, ya que la vegetación primaria cumple funciones hidrológicas críticas que están siendo comprometidas.

3.2 Modelación hidrológica

Es conocido que los modelos hidrológicos distribuidos son útiles al momento de simular escenarios, los cuales, determinan la influencia de ciertos parámetros; para el presente estudio la prioridad es determinar la influencia del cambio de uso y cobertura de suelo sobre el caudal en punto de aforo. Los hidrogramas resultantes de las simulaciones correspondientes a los años 2015 y 2020 nos muestran una variación en el caudal simulado en $m^3\ s^{-1}$ y volumen simulado en Hm3, para un periodo de tiempo de 43.800 min (información mensual) (Figura 6), teniendo: 1) caudal máximo observado de 5.6 $m^3\ s^{-1}$ y volumen observado de 217.4 Hm^3 (para los dos escenarios); 2) caudal máximo simulado de 5.7 $m^3\ s^{-1}$ (escenario 2015) y 5.7 $m^3\ s^{-1}$ (escenario 2020); 3) volumen simulado de 186.5 (escenario 2015) y 186.7 (escenario 2020); y 4) valor del RMSE de 1.01 e índice de Nash-Sutcliffe de 0.03 (para los dos escenarios) (Tabla 3).

Tabla 3. Resultados. A (simulación correspondiente al año 2015 y B (simulación correspondiente al año 2020).

A			B		
Descripción	**Cantidad**	**Unidad**	**Descripción**	**Cantidad**	**Unidad**
Caudal máximo observado	5.6	$m^3\ s^{-1}$	Caudal máximo observado	5.6	$m^3\ s^{-1}$
Caudal máximo simulado	5.7	$m^3\ s^{-1}$	Caudal máximo simulado	5.7	$m^3\ s^{-1}$
RMSE	1.010		RMSE	1.010	
Volumen observado	217.4	Hm^3	Volumen observado	217.4	Hm^3
Volumen simulado	186.5	Hm^3	Volumen simulado	186.7	Hm^3
índice Nash y Sut. (NSE)	0.035		índice Nash y Sut. (NSE)	0.035	
Área acumulada	23.909	km^2	Área acumulada	23.909	km^2

El error cuadrático medio (RMSE) permite cuantificar la magnitud de la desviación entre los valores simulados y los observados, con un rango que va de cero al infinito positivo. Un valor de cero indica un ajuste perfecto, mientras que los valores más altos reflejan un peor rendimiento del modelo. En ambas

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

simulaciones se obtuvo un valor de RMSE de 1.009, lo que representa un nivel adecuado de concordancia (Cabrera, 2012).

En cuanto al criterio de eficiencia de Nash-Sutcliffe— una de las métricas más utilizadas en hidrología—, se mide en qué medida la simulación capta la variabilidad de los datos observados. En ambos escenarios se obtuvo un valor de 0.0350, cercano al valor de referencia medio ($E = 0$). Además, durante la calibración del modelo se realizaron esfuerzos para mejorar el ajuste de los caudales máximos en el hidrograma, lo que influyó en el valor de eficiencia de Nash-Sutcliffe resultante (Cabrera, 2012).

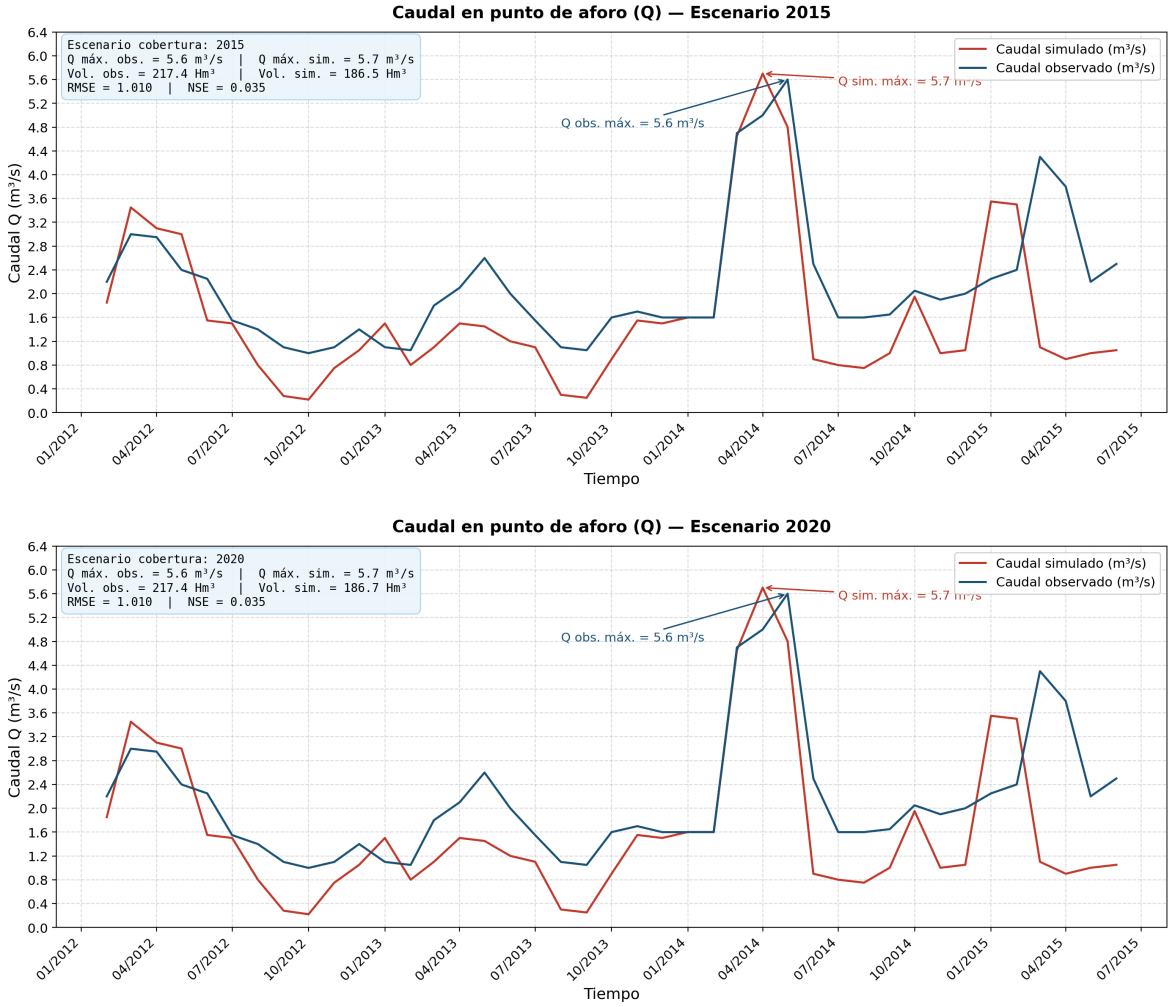


Figura 6. Gráficos hidrológicos resultantes de las simulaciones para los años 2015 y 2020.

Una de las condiciones que destacan los resultados en relación con la determinación de una mayor variabilidad en el balance hidrológico debido a los cambios en el uso y la cobertura del suelo es la disponibilidad limitada de datos meteorológicos e hidrológicos, un problema recurrente en Ecuador, especialmente en las cuencas hidrográficas amazónicas. Para el presente estudio, se implementó un diseño en el que se observa variabilidad en los caudales y volúmenes simulados, mostrando un aumento en el caudal máximo simulado de 0.002 $m^3\ s^{-1}$ y de 0.196 Hm^3 en el volumen simulado al comparar el escenario de 2020 con el de 2015.

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

En el caso de un estudio hidrológico aplicado se requeriría una mayor cantidad de datos hidrológicos y una mayor resolución temporal (por ejemplo, valores diarios) a lo largo de al menos un ciclo hidrológico completo. Esto debería incluir información sobre precipitaciones, mediciones del caudal de los arroyos y evapotranspiración, entre otros, para determinar con mayor precisión el comportamiento hidrológico de la cuenca. Además, se necesitan datos de campo sobre los parámetros iniciales requeridos por el modelo, tales como el almacenamiento estático, la capacidad de infiltración y la percolación.

3.3 Discusión

Dadas las diferencias observadas entre los aumentos de caudal y volumen obtenidos a partir de las respectivas simulaciones del modelo, es evidente que la cuenca hidrográfica presenta variabilidad en sus características hidrológicas, derivada de los cambios espaciales en el uso y la cobertura del suelo (Figura 4). Esta información es relevante debido a: (1) el riesgo ambiental asociado a la reducción de las áreas con vegetación y el consiguiente aumento del caudal en los cauces naturales debido a la disminución de la evapotranspiración; (2) la ocurrencia de eventos de inundación marcados; (3) la intensificación del déficit hídrico; y (4) la necesidad de conservación de los ecosistemas y control de la erosión.

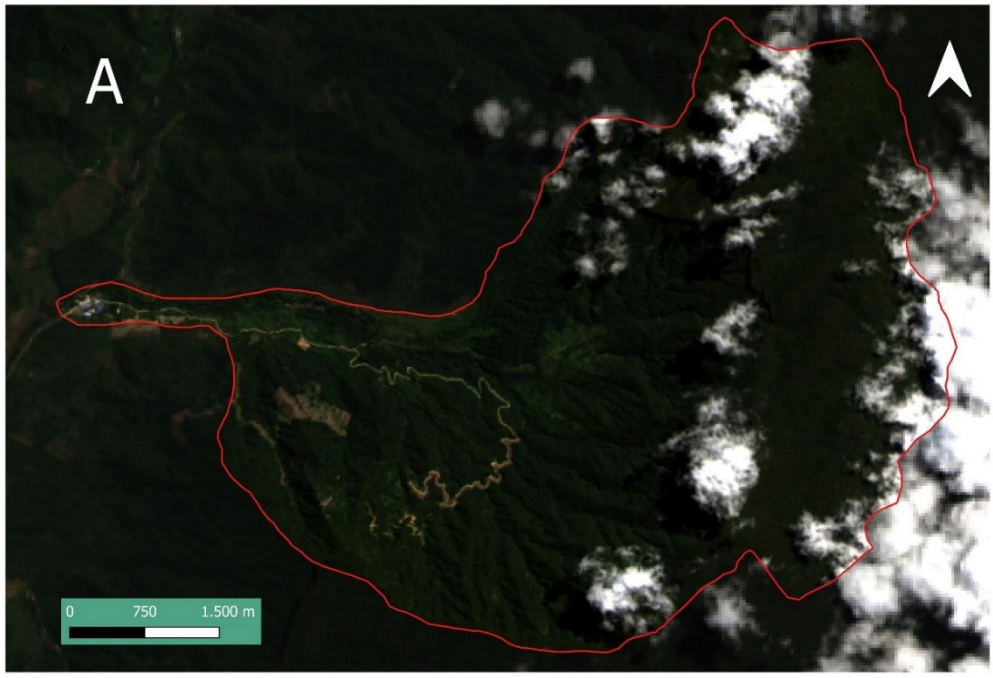
En este contexto, basándose en los resultados del presente estudio y en las disposiciones esbozadas en el Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático del Ecuador (2023-2027) (MAATE, 2023), es imperativo mejorar el monitoreo, la gestión de datos y el acceso a la información hidrológica y relacionada con el agua. Esto mejoraría la resiliencia de las poblaciones ubicadas en las zonas de influencia directa e indirecta de los proyectos extractivos, además de reducir el riesgo de pérdidas económicas asociadas a la variabilidad climática. El poder comprender y predecir los factores que modulan dichas variaciones requiere fortalecer, ampliar y mejorar el monitoreo hidrológico y meteorológico, así como la gestión y accesibilidad de los datos. Esto puede lograrse mediante acciones como la adquisición de equipos, la implementación de planes de acción estratégicos y el desarrollo de políticas relacionadas con la recopilación, gestión e intercambio de información climática a corto, mediano y largo plazo.

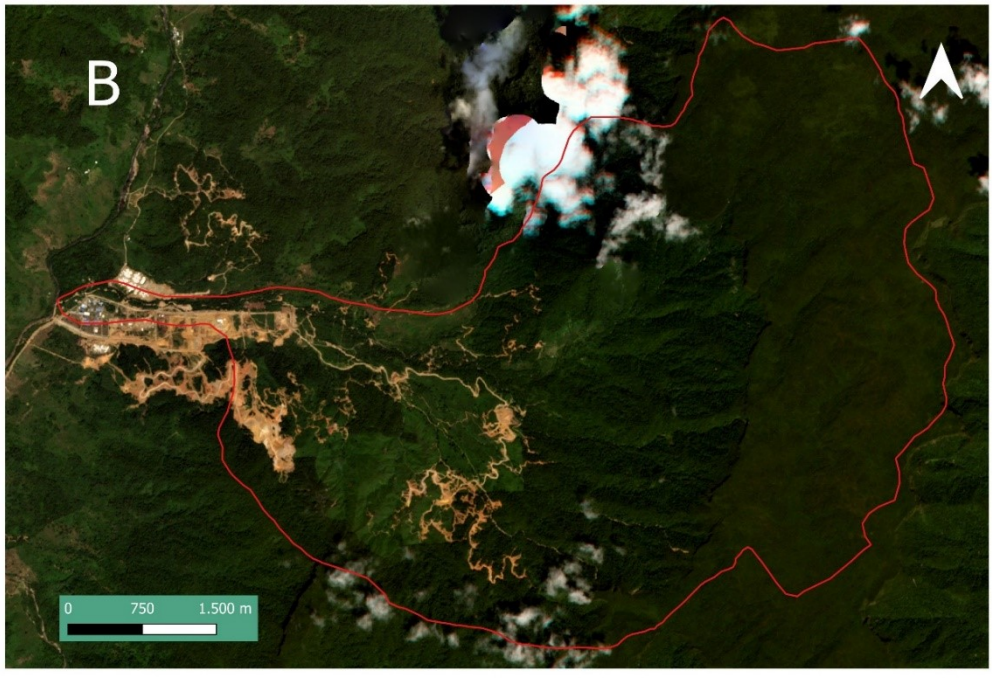
Además, es esencial establecer una gobernanza inclusiva y transparente en la gestión de los recursos hídricos, involucrando todas las partes interesadas para implementar medidas de mitigación y conservación que aborden los riesgos ambientales asociados a dichas actividades, al tiempo que se refuerza la resiliencia de las comunidades.

Es importante señalar que, dadas las limitaciones de los datos de entrada (registros mensuales, estaciones meteorológicas distantes y parámetros edafológicos estimados), los valores absolutos de caudal deben interpretarse con cautela. La incertidumbre asociada se estima en $\pm$20–30 % (Beven, 2012). Por lo tanto, la principal contribución de este estudio radica en la comparación relativa entre escenarios (un cambio de +0.02 m^3s^{-1} entre 2015 y 2020), más que en los valores absolutos modelizados. Aunque esta diferencia es pequeña en términos absolutos, representa un aumento que podría amplificarse durante los periodos de mayor precipitación.

Por último, si bien el análisis del cambio en la cobertura vegetal mediante teledetección constituye el componente más sólido de este estudio (debido a su objetividad y replicabilidad), la modelización hidrológica —a pesar de sus limitaciones— sirve para traducir estos cambios espaciales en consecuencias hidrológicas proyectadas. Los resultados del modelo deben interpretarse como indicadores de tendencias (es decir, la dirección del cambio) más que como predicciones precisas. No obstante, la metodología presentada es replicable y puede mejorarse a medida que se disponga de datos de entrada de mayor calidad.

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.





©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

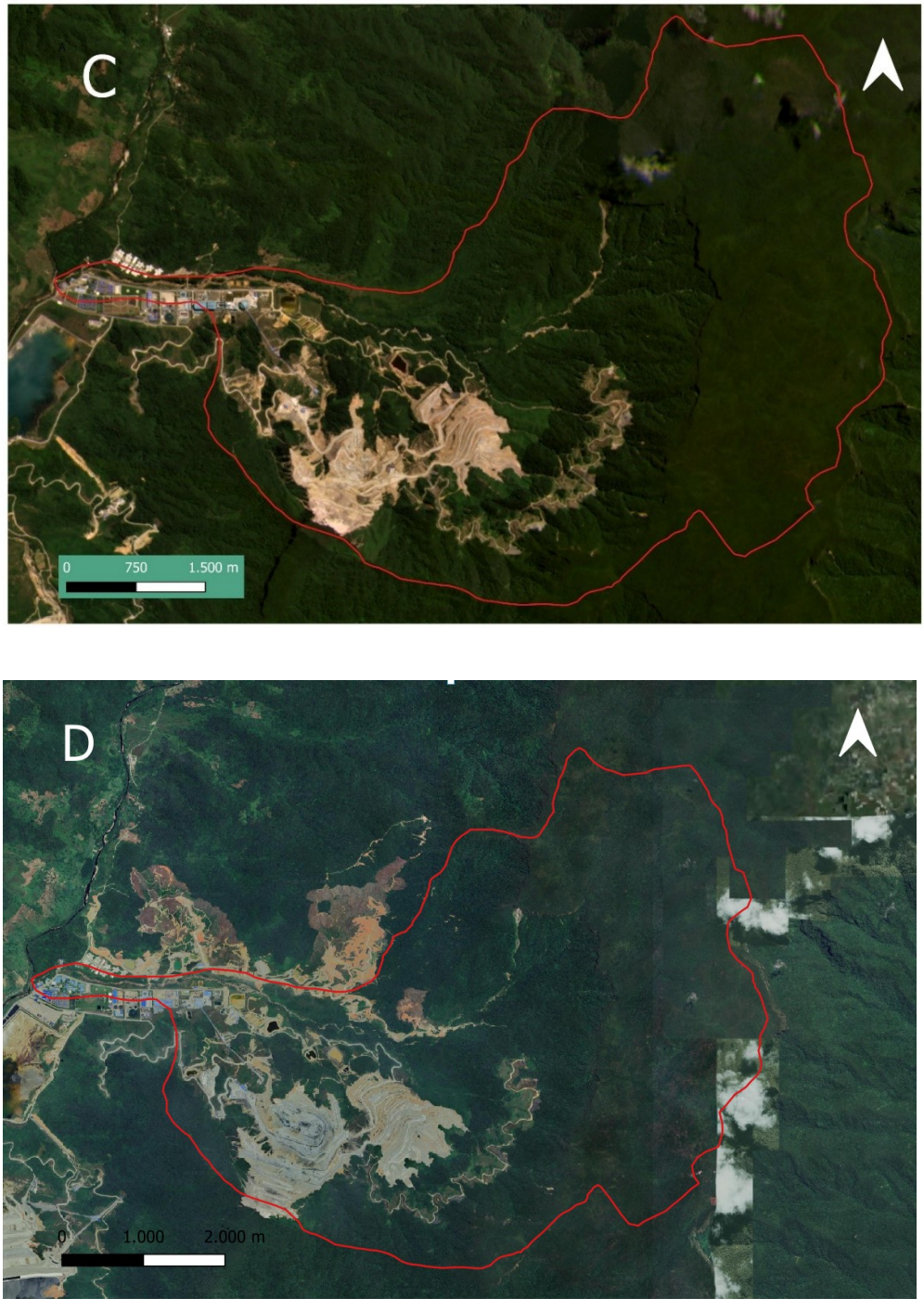


Figura 7. A (2013): Cuenca predominantemente cubierta de vegetación densa y una mínima intervención en el extremo oeste. B (2015): Aparecen claramente áreas de suelo desnudo en la zona central-oeste. Infraestructura minera visible en el margen izquierdo, inicio de evidente intervención. C (2020): Expansión significativa de la zona intervenida. Tajo abierto claramente visible en la parte central con suelo expuesto. Infraestructura minera consolidada en el margen oeste. La cobertura verde persiste en el sector oriental. D (2025): El tajo a cielo abierto domina la zona central-sur con terrazas de extracción bien definidas. Las áreas degradadas se extienden hacia el norte de la cuenca. El sector oriental mantiene cobertura forestal, pero con presión creciente.

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

4 Conclusiones

La implementación del modelo conceptual de simulación hidrológica distribuida TETIS permite identificar la variabilidad en el balance hidrológico en función de los cambios en el uso y la cobertura del suelo. Concretamente, se determinó un aumento en el caudal máximo y el volumen simulado de 0.002 m^3s^{-1} y 0.196 Hm^3, respectivamente, al comparar los escenarios para los años 2015 y 2020. Además, la calibración del modelo permitió un mejor ajuste entre las series de datos observados y simulados —en particular al lograr un ajuste adecuado de los caudales máximos en los hidrogramas—, lo que arrojó resultados satisfactorios para las funciones objetivo RMSE y Nash–Sutcliffe.

Mediante la aplicación del sistema de clasificación de la FAO (2005) a través del complemento SCP y su metodología de posprocesamiento, se evaluaron los cambios en la cobertura del suelo en la cuenca hidrográfica. Los resultados indican una disminución del 14.35 % en las áreas principalmente vegetadas y un aumento del 13.86 % en las áreas principalmente no vegetadas entre 2013 y 2020, como lo evidencia la comparación multitemporal correspondiente.

En consecuencia, teniendo en cuenta que la cuenca se encuentra dentro de ecosistemas únicos de alta diversidad biológica (región amazónica ecuatoriana), es esencial implementar prácticas adecuadas de gestión extractiva. La falta de planificación y la sobreexplotación de los recursos naturales pueden conducir a graves alteraciones ambientales, que afectan particularmente a los recursos hídricos. Por lo tanto, la metodología aplicada pone de relieve los problemas asociados a la reducción de la cobertura vegetal, reflejados en parte a través de la variabilidad hidrológica.

Asimismo, es importante evaluar la eficacia de los marcos normativos actuales para la protección de las cuencas hidrográficas en las zonas mineras de Ecuador, y proponer mejoras basadas en la evidencia científica como parte de las estrategias de política pública en la región. En este sentido, la presente investigación sirve como punto de partida a partir del cual deben desarrollarse medidas adecuadas para minimizar los riesgos asociados a los eventos de inundación y sus impactos ambientales.

Por último, se proponen las siguientes líneas de investigación futuras: (1) la implementación de redes de monitoreo hidrometeorológico de alta resolución temporal dentro de la cuenca; (2) la evaluación de la eficacia de las medidas de mitigación implementadas por el proyecto minero; (3) el desarrollo de estudios de calidad del agua para complementar el análisis cuantitativo; (4) la extensión del análisis a otras cuencas amazónicas con actividades mineras similares; y (5) el desarrollo de modelos predictivos que incorporen escenarios de cambio climático.

Declaración de uso de inteligencia artificial

Los autores DECLARAN que, durante la preparación del artículo titulado «Variabilidad hidrológica por cambio de cobertura de suelo en la cuenca del río Wawayme debido a actividades mineras, Ecuador», no se utilizaron herramientas de inteligencia artificial generativa ni sistemas automatizados de asistencia para la redacción, análisis, interpretación de datos, generación de contenido, traducción o edición del manuscrito.

Los autores asumen plena responsabilidad por el contenido, la originalidad, la integridad y la versión final del artículo.

Contribución de los autores

R.A.M.F.: Conceptualización, análisis formal, investigación, metodología, recursos, software, visualización, escritura – borrador original. **M.Z.F.L.:** Investigación, supervisión, validación, escritura – revisión y edición.

Referencias

Angelo, J., y Sempere, F. (2018). Extracción minera y derechos humanos: Impactos adversos y caminos hacia un desarrollo sostenible. *Revista Internacional de Cooperación y Desarrollo*, *5*, 105–123. Online: https://doi.org/10.21500/23825014.3598

Angulo, M. A., y Saavedra, O. C. (2018). Modelación hidrológica de la cuenca maylanco utilizando hec-hms. *Investigación y Desarrollo*, *18*, 53–

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

67. Online: https://doi.org/10.23881/idupbo.018.1-4i

Barceló Coll, J., Nicolás Rodrigo, G., Sabater García, B., y Sánchez Tamés, R. (2000). *Fisiología vegetal* (9.ª ed.). Ediciones Pirámide. Online: https://n9.cl/kqk4d0

Barrientos, G., y cols. (2020). *Evaluación de cambios en la escorrentía bajo escenarios de uso de suelo.* Online: https://www.researchgate.net (Disponible en ResearchGate)

Beven, K. J. (2012). *Rainfall-runoff modelling: The primer* (2.ª ed.). John Wiley & Sons. Online: https://doi.org/10.1002/9781119951001

Bustamante, T., Espinoza, M., Ruiz, L., Trujillo, J., y Uquillas, J. (1993). *Retos de la amazonía*. Quito, Ecuador: Abya-Yala. Online: https://n9.cl/d32rk

Cabrera, J. (2012). Calibración de modelos hidrológicos. *Instituto para la Mitigación de los Efectos del Fenómeno El Niño, Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Civil, Perú*, *1*(1).

Custode, E., y Sourdat, M. (1986). Paisajes y suelos de la amazonía ecuatoriana: entre la conservación y la explotación. *Revista del Banco Central del Ecuador*, *8*, 325–337.

Daily, G. C., y Ehrlich, P. R. (1992). Population, sustainability, and earth's carrying capacity. *BioScience*, *42*, 761–771. Online: https://doi.org/10.2307/1311995

de Jong, L., De Bruin, S., Knoop, J., y van Vliet, J. (2021). Understanding land-use change conflict: a systematic review of case studies. *Journal of Land Use Science*, *16*, 223–239. Online: https://doi.org/10.1080/1747423X.2021.1933226

Dingman, S. L. (2014). *Physical hydrology* (3.ª ed.). Waveland Press. Online: https://www.waveland.com/browse.php?t=382

Fang, H., y Fan, Z. (2021). Effects of land use/cover change on hydrological processes. *Environmental Earth Sciences*, *80*, 1–15. Online: https://doi.org/10.1007/s12665-021-09574-0

FAO. (2005). *Land cover classification system - classification concepts and user manual* (Inf. Téc.). Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Giraldo, M., Ramírez, J., y Galán, A. (2013). *Amazonia posible y sostenible* (Naciones Unidas, Ed.). Bogotá: Naciones Unidas.

Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente (IIAMA). (2021). *Modelo hidrológico tetis: Manual técnico* (Inf. Téc.). Valencia: Universidad Politécnica de Valencia. Online: https://www.iiama.upv.es

Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP). (2018). *Agroforestería sostenible en la amazonía ecuatoriana, no 2. fragilidad de los suelos en la amazonía ecuatoriana y potenciales alternativas agroforestales para el manejo sostenible* (Inf. Téc.). INIAP.

MAATE. (2023). *Plan nacional de adaptación al cambio climático del ecuador (2022-2027)* (Inf. Téc.). Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica del Ecuador.

Mintegui Aguirre, J. , y Robredo Sánchez, J. C. (1994). Caracterización de las cuencas hidrográficas, objeto de restauración higrológico-forestal, mediante modelos hidrológicos. *Ingeniería del Agua*, *1*. Online: https://doi.org/10.4995/ia.1994.2637

Mintegui Aguirre, J. , y Robredo Sánchez, J. C. (2008). *Estrategias para el control de los fenómenos torrenciales y la ordenación sustentable de las aguas, suelos y bosques de las cuencas de montaña.* (Documento técnico/Libro)

Montaño, D. (2021). *Nuevo estudio: en los últimos 26 años ecuador ha perdido más de 2 millones de hectáreas de bosque.* (Reporte de prensa/Artículo)

Moreno Farfán, R. A. (2022). Restauración geomorfológica sobre depósitos de relaves: caso de estudio aplicado a la concesión minera río blanco, ecuador. *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida*, *37*. Online: https://doi.org/10.17163/lgr.n37.2023.10

Nobre, C. A., Sampaio, G., Borma, L. S., Castilla-Rubio, J. C., Silva, J. S., y Cardoso, M. (2016). Land-use and climate change risks in the amazon and the need of a novel sustainable development paradigm. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *113*, 10759–10768. Online: https://doi.org/10.1073/pnas.1605516113

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Pascual, J. (2002). *Cambios del suelo y régimen hídrico en la rambla de poyo y el barranc de carraixet.* (Tesis/Informe de investigación)

Paz, A. (2024). *Ecuador perdió poco más de un millón de hectáreas de formación boscosas en 38 años.* Online: https://n9.cl/nuqhvb

Prats, A., Torrent, J., López, M., y del Campo García, A. (2011). Influencia de la vegetación en el ciclo hidrológico, factores escorrentía e infiltración. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales*(32), 137–143.

Rodríguez-Lloveras, X., y cols. (2015). Hydrological response to land-use changes. *Hydrological Processes*, *29*(7), 1625–1637. Online: https://doi.org/10.1002/hyp.10215

Siswanto, S. Y., y Francés, F. (2019). How land use/land cover changes can affect water, flooding and sedimentation in a tropical watershed: a case study using distributed modeling in the upper citarum watershed, indonesia. *Environmental Earth Sciences*, *78*, 550. Online: https://doi.org/10.1007/s12665-019-8561-0

Suquilanda, M. (2008). El deterioro de los suelos en el ecuador y la producción agrícola. En *Memorias del xi congreso ecuatoriano de la ciencia del suelo* (p. 12). Quito, Ecuador: Sociedad Ecuatoriana de la Ciencia del Suelo. Online: https://n9.cl/ay5i8o

Tejada Espinoza, H. (2016). *Caracterización del régimen de crecidas mediante la implementación del modelo hidrológico tetis en la cuenca del barranco del carraixet - valencia.* (Trabajo de investigación / Tesis)

Terán, C. (2017). *Curso virtual de modelamiento hidrológico distribuido con tetis v. 8.3.1.*

Vásconez, M., y Torres, L. (2018). Minería en el ecuador: sostenibilidad y licitud. *Revista Estudio Desarrollo Social: Cuba y América Latina*, *6*, 83–103. Online: https://n9.cl/g5fjq

Winkler, K., Fuchs, R., Rounsevell, M., y Herold, M. (2021). Global land use changes are four times greater than previously estimated. *Nature Communications*, *12*, 2501. Online: https://doi.org/10.1038/s41467-021-22702-2

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

La Granja:
Revista de
Ciencias de la Vida

pISSN:1390-3799; eISSN:1390-8596

https://doi.org/10.17163/lgr.n44.2026.05

Artículo científico / Scientific paper

Biotecnología

CC BY NC SA

Extracto liofilizado de *Ilex guayusa*: potencial ingrediente para bebidas energizantes

Freeze-dried extract of *Ilex guayusa*: a potential ingredient for energy drinks

Laura Scalvenzi*[1], Sting Luna Fox[2] y Matteo Radice[1]

[1] *Universidad Estatal Amazónica. Departamento de Matemáticas y Ciencias Físicas. Puyo, Ecuador.* [https://ror.org/029ss0s83]
[2] *Instituto de Investigaciones en Ciencia y Tecnología de Materiales. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas. Universidad Nacional de Mar del Plata. Mar del Plata, Argentina.*[https://ror.org/055eqsb67]

*Autor para correspondencia: lscalvenzi@uea.edu.ec

Manuscrito recibido el 6 de febrero de 2025. Aceptado, tras revisión el 10 de julio de 2025. Publicado el 1 de septiembre de 2026.

Resumen

El objetivo de este estudio es producir y analizar un extracto liofilizado de *Ilex guayusa*, con elevada concentración de cafeína y con potencial de uso como ingrediente de bebidas energizantes. La extracción de cafeína desde hojas secas se realizó mediante ultrasonido en medio acuoso. Los parámetros considerados fueron: tiempo, concentración de ácido cítrico, amplitud ultrasónica, relación sólido-líquido. Los factores significativos se optimizaron mediante un diseño de superficie de respuesta Box-Behnken. Se evaluaron los parámetros fisicoquímicos y los metales pesados según la norma (Servicio Ecuatoriano de Normalización (INEN), 2013). La vida útil se determinó mediante pruebas aceleradas de temperatura. Los resultados mostraron que el tiempo, la concentración de ácido cítrico y la amplitud ultrasónica tuvieron efectos significativos sobre la extracción de cafeína, mientras que la relación sólido-líquido no fue significativa. Las condiciones óptimas para la extracción de cafeína fueron en un tiempo de 26.94 min, una concentración de ácido cítrico del 2.72%, una amplitud ultrasónica de 68.29% y una concentración de cafeína de 3.36%. Los parámetros fisicoquímicos del liofilizado fueron: humedad (1.2±0.1%), cenizas totales (11.87±0.12%), pH (5.1±0.2), solubilidad en caliente (17±1 s) y solubilidad en frío (1.8±0.2 minutos). Los niveles de metales pesados fueron: zinc (19.16±0.04 mg/kg), cobre (12.35±0.23 mg/kg) y estaño (8.64±0.17 mg/kg). La vida útil del producto liofilizado a 20 °C fue de 3.5 meses. El presente estudio proporciona información valiosa para el desarrollo de un producto liofilizado rico en cafeína.

Palabras clave: Ácido cítrico, cafeína, extracto acuoso, extracción con ultrasonido, optimización.

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Abstract

The objective of this study is to produce and analyze a freeze-dried extract of *Ilex guayusa*, with a high caffeine concentration potentially used as ingredient in energy drinks. The caffeine extraction from dried leaves was done by ultrasounds, using water as solvent. The parameters considered were time, citric acid concentration, ultrasonic amplitude, solid/liquid ratio. Significant factors were optimized using a Box-Behnken response surface design. Physicochemical parameters and heavy metals were performed according to (Servicio Ecuatoriano de Normalización (INEN), 2013). The shelf life was determined by accelerated temperature tests. The results showed that time, citric acid concentration and ultrasonic amplitude had significant effects on caffeine extraction, while the solid-liquid ratio was not significant. The optimum conditions for caffeine extraction were a time of 26.94 minutes, a citric acid concentration of 2.72%, an ultrasonic amplitude of 68.29% and caffeine concentration of 3.36%. The physicochemical parameters of the freeze-dried product were: moisture of 1.2±0.1%, total ash of 11.87±0.12%, pH of 5.1±0.2, hot solubility of 17±1 s and cold solubility of 1.8±0.2 minutes. The levels of heavy metals found were zinc (19.16±0.04 mg/kg), copper (12.35±0.23 mg/kg) and tin (8.64±0.17 mg/kg). The shelf life of the freeze-dried extract at 20 °C was 3.5 months. This paper provides valuable information for developing a freeze-dried product rich in caffeine.

Keywords: Citric acid, caffeine, aqueous extract, ultrasound extraction, optimization.

Forma sugerida de citar: Scalvenzi, L., Luna, S. y Radice, M. (2026). Extracto liofilizado de *Ilex guayusa*: potencial ingrediente para bebidas energizantes. *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida.* Vol. 44(2):80-98. https://doi.org/10.17163/lgr.n44.2026.05.

Orcid IDs:

Laura Scalvenzi: https://orcid.org/0000-0001-6015-9871
Sting Luna Fox: https://orcid.org/0000-0001-6058-7024
Matteo Radice: https://orcid.org/0000-0002-4771-8912

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

1 Introducción

Ilex guayusa Loes. es una planta de gran importancia cultural y medicinal en las regiones amazónicas de Ecuador, Perú, Colombia y Bolivia, donde crece en altitudes que varían entre los 200 y 2000 metros sobre el nivel del mar. Esta especie, que puede alcanzar alturas de hasta 30 metros, ha sido empleada durante siglos por los pueblos indígenas por sus diversas propiedades medicinales, que incluyen usos antifebriles, diuréticos, analgésicos y aplicaciones en el tratamiento de la artritis y la mejora de la fertilidad (Meneses y cols., 2024). Sin embargo, el uso más popular de *I. guayusa* se debe a su contenido estimulante, principalmente derivado de su alta concentración de cafeína, que supera el 3% en las hojas (Negrin y cols., 2019).

La creciente demanda global de productos naturales con propiedades funcionales ha impulsado el interés por *I. guayusa*, cuyas hojas no solo contienen cafeína, sino también una variedad de compuestos bioactivos, como antioxidantes, antiinflamatorios y antibacterianos (Cakmak y cols., 2023). Investigaciones recientes han identificado la presencia de teobromina, teofilina y ácidos clorogénicos, que aportan beneficios adicionales para la salud, además de la acción estimulante de la cafeína (Chianese y cols., 2019; Cadena-Carrera y cols., 2019). Entre los compuestos fenólicos detectados en los extractos de hojas de *I. guayusa*, se han identificado 14 compuestos, incluidos derivados del ácido clorogénico y flavonoides como la quercetina, lo que refuerza su potencial como ingrediente funcional en la formulación de nuevos productos (García-Ruiz y cols., 2017).

La extracción de cafeína se ha realizado tradicionalmente mediante varios métodos, entre los que se incluyen la extracción con disolventes orgánicos, la extracción por maceración y la extracción Soxhlet. Aunque estos métodos sean efectivos, muchos presentan desventajas significativas, como el uso de disolventes tóxicos, largos tiempos de procesamiento y altas temperaturas que pueden degradar los compuestos bioactivos (Ivanović y cols., 2020; Lezoul y cols., 2020). En los últimos años, se ha hecho énfasis en desarrollar técnicas de extracción más eficientes y ecológicas. La extracción asistida por ultrasonido (EAU) ha ganado popularidad debido a su capacidad para mejorar la eficiencia de extracción mediante la cavitación acústica, un proceso que genera microburbujas en el medio líquido, lo que facilita la ruptura de las paredes celulares y la liberación de compuestos bioactivos como la cafeína (Kumar y cols., 2020).

La EAU ofrece varias ventajas sobre las técnicas convencionales, incluyendo tiempos de extracción más cortos, menores temperaturas y la posibilidad de utilizar disolventes más seguros, como el agua, lo que la convierte en una opción sostenible para la industria alimentaria y farmacéutica (Carreira-Casais y cols., 2021). Además, la combinación de ácido cítrico como acidificante mejora aún más la extracción de alcaloides, ya que en medios ácidos estos compuestos se liberan con mayor facilidad (Yang y cols., 2024). Esto hace de la EAU una técnica ideal para maximizar la extracción de cafeína desde las hojas de *I. guayusa*.

En paralelo, la creciente demanda de productos naturales y funcionales ha puesto de relieve la importancia de desarrollar alternativas saludables a las bebidas energizantes comerciales, que a menudo contienen aditivos sintéticos. Un producto liofilizado a base de *I. guayusa* no solo aprovecharía las propiedades bioactivas de la planta, sino que también respondería a las exigencias del mercado actual, que busca productos energéticos naturales que ofrezcen beneficios adicionales para la salud, como antioxidantes y compuestos antiinflamatorios. *I. guayusa*, debido a su contenido de cafeína y otros compuestos polifenólicos beneficiosos, representa una opción potencial para crear un producto innovador que pueda ser reconstituido como bebida energética. El objetivo del presente estudio es formular y evaluar el tiempo de vida útil de un producto liofilizado de *I. guayusa* destinado a la elaboración de una bebida energizante.

2 Materiales y Métodos

2.1 Materia prima y preparación de la muestra

Las hojas de *I. guayusa* se adquirieron secas en el mercado de "Los plátanos" de la ciudad de Puyo, Ecuador, localizado en las coordenadas 1.4837° S y 78.0026° W (Laboratorio de Bromatología de la Universidad Estatal Amazónica, km 2 ½ vía Tena,

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

cantón y provincia de Pastaza.) Estas hojas se pulverizaron en un molino (marca KitchenAid, modelo BCG111OB) y fueron tamizadas hasta obtener un diámetro de partícula inferior a 0.5 mm. El ácido cítrico (pureza >99 %) de grado alimenticio, utilizado para favorecer la extracción de cafeína, fue adquirido en la tienda de químicos "QUIMICOSAS" ubicada en la ciudad de Quito, Ecuador.

2.2 Extracción de cafeína con asistencia de ultrasonido

Se realizó una extracción sólido-líquido mediante baño de ultrasonido termostático (marca Wisd.23, modelo WUC-DO6H). Las extracciones se realizaron según las condiciones establecidas para cada experimento. Las muestras de *I. guayusa* pulverizada se pesaron en matraces de 200 mL y se adicionaron 100 mL de una disolución (m/v) de ácido cítrico disuelto en agua. Los matraces se colocaron en el equipo calibrado previamente a una temperatura constante de 50 °C. Los extractos obtenidos se filtraron usando papel Whatman N° 4. La determinación del contenido en cafeína se realizó de inmediato.

2.3 Determinación espectrofotométrica de cafeína

La determinación de cafeína se realizó mediante espectrometría, según la metodología empleada por (Luna-Fox y cols., 2024). 1 mL de NaOH (0.1 M) fue agregado a 10 mL de extracto acuoso de guayusa con el fin de aumentar el pH de la solución. La cafeína se extrajo en dos fracciones de 15 mL de cloroformo cada una. Los extractos obtenidos se combinaron y luego se evaporaron en un baño María. La cafeína resultante se disolvió en 50 mL de agua caliente (a una temperatura entre 60 y 90 °C) y se dejó enfriar. Posteriormente, la disolución se transfirió a un frasco de 100 mL, ajustando el volumen final con agua destilada. 5 mL de dicha disolución fueron dispuestos en un matraz aforado de 25 mL y se añadió 1 mL de HCl (0.01 M); posteriormente se completó con agua destilada. Finalmente, se midió la absorbancia de las muestras a 275 nm en un espectrofotómetro UV-vis (marca Perkin Elmer, modelo Lambda 20) y se determinó la concentración utilizando la curva de calibración obtenida a partir de nueve concentraciones (1, 2, 3, 5, 10, 12, 16, 20 y 25 mg/mL; R^2=0,9991), según la ecuación (1). Los resultados se expresaron en porcentaje con base en la materia seca.

$$A = 0.006C + 0.0011 \quad (1)$$

Donde, C: concentración de cafeína en la muestra (mg/mL) y A: absorbancia de la muestra.

2.4 Diseño experimental

El experimento se realizó en dos etapas. En la fase inicial se utilizó un diseño factorial de dos niveles y cuatro factores (Tabla 1), que abarcó 36 experimentos: 16 ensayos con 2 réplicas cada uno y 4 repeticiones en el punto central, con el fin de evaluar la curvatura del modelo. Se analizó la influencia del tiempo de extracción, la concentración de ácido cítrico, la amplitud ultrasónica y la relación sólido/líquido sobre el contenido de cafeína en las hojas de *I. guayusa*. Para identificar las variables significativas y no significativas se empleó un diagrama de efectos estandarizados, mientras que la selección de las variables relevantes se consolidó mediante el diagrama de Pareto y el límite de Bonferroni (Anderson y Whitcomb, 2016).

En la segunda fase se analizaron las variables significativas para determinar los niveles óptimos de las variables estudiadas, con el fin de optimizar la extracción de cafeína. Para ello, se utilizó un diseño Box-Behnken (Metodología de Superficie de Respuesta - MSR) implementado mediante el software Design Expert versión 13.0.5.0 (versión de prueba, Stat-Ease Inc., Minneapolis, MN, EE. UU.). Los resultados experimentales se ajustaron empleando el siguiente modelo polinómico de segundo orden:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^{n} \beta_{ii} x_i + \sum_{i=1}^{n} \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^{n} \beta_{ij} x_i x_j \quad (2)$$

Donde y indica la respuesta estimada, mientras que β_0, β_{ii} y β_{ij} simbolizan los coeficientes de regresión vinculados a los términos medio, lineal, y cuadrático, respectivamente. Estos se determinaron a partir de los resultados experimentales, empleando el método de mínimos cuadrados. Las variables independientes x_i y x_j se codificaron en un intervalo de -1 a 1.

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Tabla 1. Niveles de las variables estudiadas.

Variable de estudio		Niveles		
	Código	Bajo -1	Central 0	Alto 1
Tiempo (min)	A	15	22.5	30
Ácido cítrico (%)	B	0	1.5	3
Amplitud ultrasónica (%)	C	30	50	70
Relación sólido-líquido (m/v)	D	5	10	15

2.5 Validación del modelo

Para corroborar el modelo se examinaron las cifras de los coeficientes de R^2 ajustado y R^2 previsto. La validez de cada serie experimental, junto con la del modelo, fue comprobada a través de un análisis de varianza (ANOVA) (Dinardo y cols., 2019). La optimización de la extracción de cafeína de las hojas secas de *I. guayusa* se realizó teniendo en cuenta como factores independientes el tiempo de extracción, la concentración de ácido cítrico y la amplitud ultrasónica. Se establecieron las condiciones ideales de extracción empleando la ecuación predictiva de la metodología de superficie de respuesta.

2.6 Preparación del producto liofilizado

El producto liofilizado se obtuvo a partir del extracto acuoso obtenido bajo las condiciones óptimas de extracción, el cual fue procesado en un equipo liofilizador (marca SCANVAC, modelo COOLSAFE). Las condiciones de operación fueron: temperatura del condensador de -90 °C, presión de 0.105 Torr y un tiempo de procesamiento de 7 días.

2.7 Determinación de parámetros fisicoquímicos y metales pesados en el extracto liofilizado

Se analizó la humedad, el pH, la solubilidad en agua caliente y fría, contenido de cenizas totales y metales pesados (plomo, cadmio, zinc, cobre, arsénico y estaño), según los procedimientos establecidos por la norma técnica ecuatoriana (NTE) (Servicio Ecuatoriano de Normalización (INEN), 2013) perteneciente al café liofilizado. Los análisis se realizaron utilizando el espectrofotómetro de absorción atómica (Perkin Elmer, Modelo A Analyst 800, dimensiones 1524.00 x 1016.00 x 812.80 mm, automatic sampler AS800, peso 136.08 kg). Los resultados de este estudio se compararon con los límites permisibles propuestos por la NTE (Servicio Ecuatoriano de Normalización (INEN), 2013) del café soluble, ya que es el producto que más se asemeja al obtenido en este estudio, además, no existe actualmente una norma INEN para *I. guayusa*. En la Tabla 2 se muestra el estándar empleado para cada análisis.

2.8 Determinación del tiempo de vida útil

La vida útil del extracto liofilizado se determinó mediante pruebas aceleradas de temperatura, considerando la humedad como parámetro de medición. Para ello, se pesó por triplicado 1 g de extracto liofilizado en recipientes de vidrio con tapa giratoria y se colocaron en una estufa (marca MEMMERT, modelo SFE700) a 30, 40 y 50 °C. El contenido de humedad se evaluó a los 0, 7, 14, 21 y 28 días. Los datos se adaptaron a la ecuación diferencial (3) propuesta por Herrera y cols. (2022).

$$\frac{dH}{dt} = kH^n \tag{3}$$

Donde H es la humedad del extracto liofilizado, k representa la constante cinética de reacción, t indica el tiempo y n el orden de la reacción. Los resultados experimentales en este estudio siguieron una reacción de orden 1, por la tanto, al integrar la ecuación (3) desde un contenido de humedad H_0 hasta H, y desde un tiempo inicial de 0 hasta t, se obtuvo la ecuación (4) que permitió determinar la vida útil del extracto liofilizado.

$$\ln(H) = \ln(H_0) + kt \tag{4}$$

La constante cinética de reacción (k) se determinó mediante la ecuación linealizada de Arrhenius (5) graficando ln(k) contra el inverso de la temperatura (1/T).

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

$$\ln(k) = \ln(k_0) - \frac{E_a}{RT} \quad (5)$$

Donde k_0 es el factor pre-exponencial, Ea representa a la energía de activación (kJ/mol), R es la constante universal de los gases (8.314 kJ/molK) y T la temperatura absoluta (K). La vida útil se estimó a una temperatura de 20 °C. Los datos se procesaron en el software Origin Pro 2022 (OriginLab, Northampton, MA, USA).

Tabla 2. Análisis fisicoquímicos y de metales pesados según la NTE INEN 1122:2013

Análisis	Método de ensayo
H (%)	NTE INEN-ISO 3726
CT (%)	NTE INEN 1117
pH	NTE INEN 389
SC (s)	Ensayo de taza
SF (min)	Ensayo de taza
Pb (mg/kg)	Espectrofotometría de absorción atómica
Cd (mg/kg)	
Zn (mg/kg)	
Cu (mg/kg)	
As (mg/kg)	
Sn (mg/kg)	

H: humedad, CT: cenizas totales, SC: solubilidad en agua caliente, SF: solubilidad en agua fría, Pb: plomo, Cd: cadmio, Zn: zinc, Cu: cobre, As: arsénico, Sn: estaño.

3 Resultados y Discusión

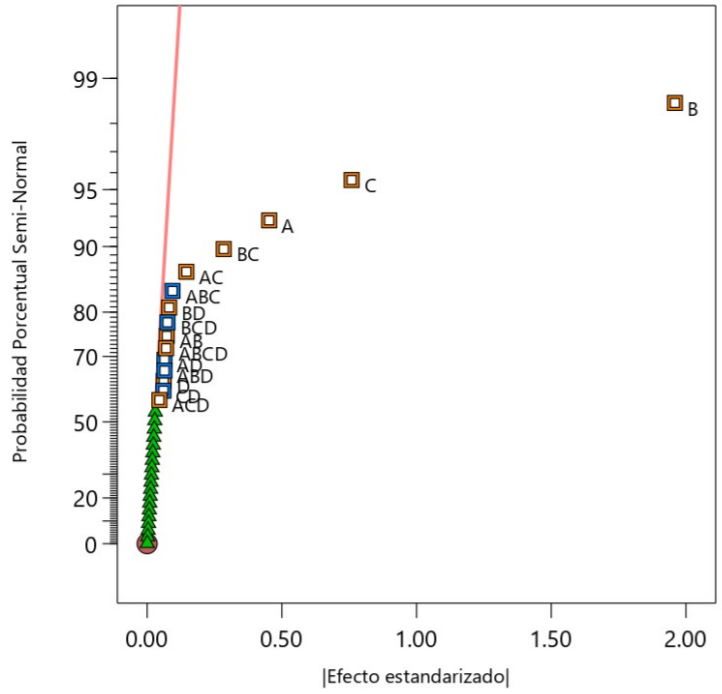
3.1 Efecto de los factores de estudio sobre la extracción de cafeína

La estimación de los efectos estandarizados, tanto positivos como negativos, en la EAU de cafeína se muestran en Figura 1A, donde las variables significativas corresponden con los valores más altos de los efectos estandarizados ($\geq$ 0,5) según lo mencionado por Held y cols. (2023). Por otro lado, los efectos no significativos (<0,5) siguieron una distribución normal con una media de cero y variación constante. Esto indica que, al graficar los efectos en un gráfico de probabilidad normal, los efectos no significativos se ubican sobre una línea recta, mientras que los efectos activos se apartan de esa línea de normalidad.

El diagrama de Pareto, junto con el límite de Bonferroni, reforzaron la elección de los factores significativos. Como se indica en la Figura 1B, el tiempo de extracción (A), la concentración de ácido cítrico (B) y la amplitud ultrasónica (C), se ubicaron por encima del límite de Bonferroni, indicando que fueron variables significativas, y la relación sólido-líquido se ubicó por debajo de este límite, mostrando que no tuvo influencia estadística. Asimismo, según los resultados mostrados en la Tabla 3, se confirman las variables significativas ($p<0.05$) y no significativas ($p>0.05$). Las interacciones entre las variables estudiadas (A, B, C y D) tampoco fueron significativas. El modelo factorial presentó un buen ajuste, respaldado por un coeficiente de determinación (R^2) igual a 0.9934. Además, la diferencia entre el R^2-ajustado (0.9881) y el R^2-predicho (0.9757) fue menor a 0.2 lo cual se considera adecuada según Anderson y Whitcomb (2016) y Arteaga-Crespo y cols. (2019).

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

(A)



(B)

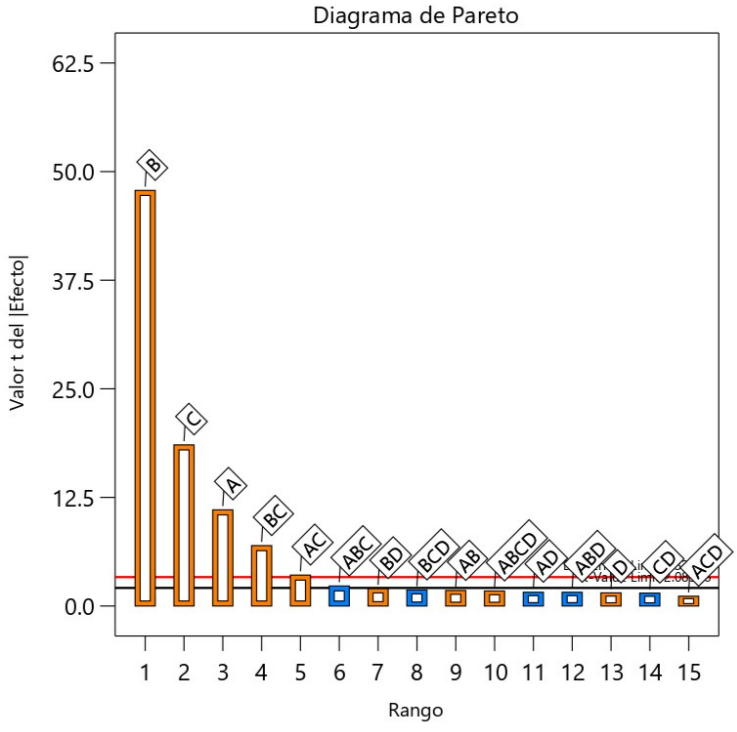


Figura 1. Efectos positivos (naranja) y negativos (azul) en la extracción de cafeína. Diagrama de distribución semi-normal (A), diagrama de Pareto (B).

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Tabla 3. ANOVA para el efecto de los factores de estudio sobre la extracción de cafeína.

Cafeína	Suma de cuadrados	gl	Cuadrado medio	Valor F	Valor P	
Modelo	38.33	15	2.56	19.07	< 0.0001	Significativo
A-Tiempo	1.20	1	1.20	8.92	0.0076	
B-Ac. cítrico	30.56	1	30.56	228.07	< 0.0001	
C-Amplitud	3.74	1	3.74	27.91	< 0.0001	
D-Relación S/L	0.0004	1	0.0004	0.0028	0.9582	
AB	0.0025	1	0.0025	0.0189	0.8921	
AC	0.3026	1	0.3026	2.26	0.1493	
AD	0.0007	1	0.0007	0.0052	0.9435	
BC	0.3970	1	0.3970	2.96	0.1014	
BD	0.0055	1	0.0055	0.0412	0.8413	
CD	0.0003	1	0.0003	0.0019	0.9656	
ABC	0.0118	1	0.0118	0.0881	0.7699	
ABD	0.0007	1	0.0007	0.0052	0.9435	
ACD	0.0006	1	0.0006	0.0047	0.9459	
BCD	0.0033	1	0.0033	0.0244	0.8776	
ABCD	0.0019	1	0.0019	0.0141	0.9068	
Residual	2.55	19	0.1340			
Falta de ajuste	0.0042	1	0.0022	1.45	0.895	No significativo
Error puro	0.0170	18	0.0009			

Estudios previos han destacado la influencia positiva del tiempo de extracción y la amplitud ultrasónica en la extracción de cafeína, debido a su efecto en la ruptura celular y la transferencia de masa. Hassan y Yaqoobi (2023) observaron que un mayor tiempo y amplitud ultrasónica mejoraron significativamente el rendimiento en la EAU de cafeína en granos de café, ya que estos factores facilitan la liberación de este compuesto al aumentar la cavitación acústica. De manera similar, Serna-Jiménez y cols. (2023) reportaron una relación proporcional entre el tiempo de extracción y la recuperación de cafeína en pulpa de café, atribuyéndolo a un contacto más prolongado entre el disolvente y el material vegetal, factor que optimiza la solubilización de este alcaloide. El efecto significativo del ácido cítrico en la extracción de cafeína puede explicarse por su capacidad de acidificar el medio, optimizando la solubilidad y la liberación de cafeína. En medios ácidos, la interacción del disolvente con el material vegetal se fortalece, facilitando la extracción. Yang y cols. (2024) respaldaron esta observación al demostrar que un disolvente eutéctico compuesto de polipropilenglicol, polietilenglicol y con ácido cítrico presentó una notable eficacia al extraer cafeína de residuos de té mediante irradiación con microondas, debido a que el entorno ácido favorece su solubilidad y extracción.

El factor relación sólido/líquido no mostró influencia estadística en la extracción de cafeína, esto puede explicarse debido a que, al incrementar este factor, la cantidad de disolvente utilizado no logró cubrir adecuadamente todo el material vegetal, limitando la transferencia de masa y reduciendo la eficiencia del proceso. Esto sugiere que, a partir de cierto límite, el disolvente disponible se vuelve insuficiente para extraer la cafeína de manera efectiva. Resultados similares fueron reportados por Abreu-Naranjo y cols. (2018), quienes encontraron que la relación sólida/líquido tampoco tuvo un efecto significativo en la extracción de compuestos bioactivos de la corteza de *Maytenus macrocarpa*, lo cual refuerza la idea de que este factor puede perder relevancia cuando no se optimiza la proporción de disolvente y material vegetal.

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

3.2 Optimización del proceso de extracción

Se utilizó un diseño de optimización con 17 experimentos para determinar los niveles óptimos del tiempo de extracción, concentración de ácido cítrico y amplitud ultrasónica, que fueron las variables significativas. El objetivo de la optimización del proceso de extracción fue determinar la mejor combinación de estas tres variables para maximizar la extracción de cafeína. Se analizaron cuatro modelos matemáticos (Tabla 4) generados por el software Design-Expert, donde el modelo cuadrático presentó los mejores resultados, con un valor R^2 igual a 0.9895. Este valor muestra que el 98.95% de la variación total en la extracción de cafeína, estuvo determinada por las variables estudiadas.

Tabla 4. Modelos matemáticos generados por el software Design-Expert

Modelo	p-valor	Falta de ajuste	R^2-Ajustado	R^2-Predicho	
Lineal	0.0014	0.0033	0.6153	0.4103	
2FI	0.5796	0.0023	0.5855	-0.0627	
Cuadrático	**< 0.0001**	**0.3733**	**0.9761**	**0.9072**	**Sugerido**
Cúbico	0.3733	0.0087	0.9793	-0.1258	

Tabla 5. Concentración de cafeína Corregido por vía experimental

Cafeína (%)	Tiempo (min)	Acido cítrico (%)	Amplitud (%)
3.24	22.50	3.00	70
3.08	30.00	1.50	70
2.68	15.00	1.50	70
2.64	30.00	3.00	50
2.61	22.50	1.50	50
2.50	22.50	1.50	50
2.50	22.50	1.50	50
2.45	22.50	1.50	50
2.36	22.50	1.50	50
2.22	15.00	3.00	50
2.15	30.00	1.50	30
1.98	15.00	1.50	30
1.88	22.50	3.00	30
1.60	22.50	0.00	70
1.37	22.50	0.00	30
1.22	30.00	0.00	50
0.98	15.00	0.00	50

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

El modelo cuadrático en términos de las variables de estudio fue el siguiente:

$$\begin{aligned}\textbf{Cafeína} = {} & 0.66 + 0.10A + 0.62B - 0.03C \\ & + 0.40 \times 10^{-2}AB + 3.83 \times 10^{-4}AC \\ & + 9.42 \times 10^{-3}BC - 2.39 \times 10^{-3}A^2 \\ & - 2.60B^2 + 3.08 \times 10^{-4}C^2 \end{aligned} \quad (6)$$

Donde A, B y C representan el tiempo de extracción, la concentración de ácido cítrico y la amplitud ultrasónica respectivamente. Los resultados experimentales del contenido en cafeína se muestran en la Tabla 5 y los estimados por el modelo cuadrático fueron comparados en la Figura 2. La distribución de puntos validó la capacidad del modelo para abarcar todo el rango de experimentos analizados. Este patrón confirma la idoneidad del modelo para cubrir todo el intervalo de datos, sugiriendo que puede aplicarse con éxito.

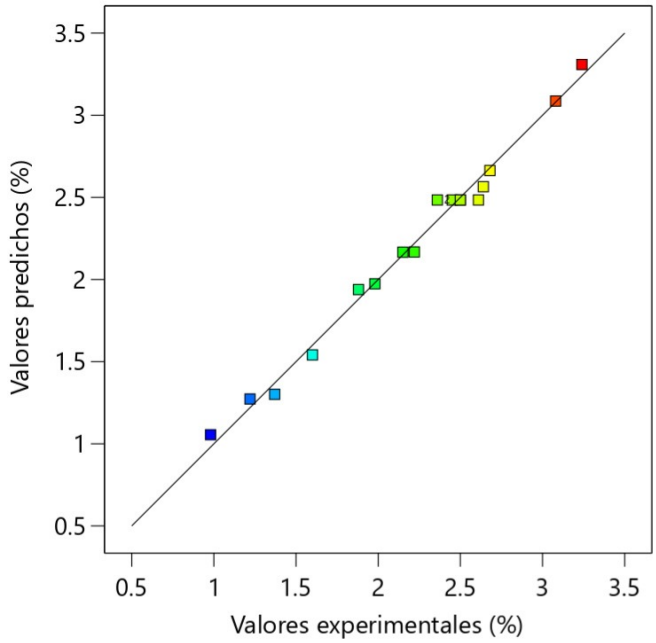


Figura 2. Resultados experimentales vs. predichos de cafeína

Las condiciones ideales de extracción, que resultaron en el máximo contenido de cafeína (3.36 %), fueron las siguientes: tiempo de extracción de 26.94 minutos, ácido cítrico al 2.72 % y amplitud ultrasónica de 68.29 %. Bajo estas condiciones experimentales, el contenido de cafeína obtenido fue de 3.22, lo que coincidió con lo predicho por el modelo cuadrático.

La significancia estadística de la ecuación de regresión, correspondiente al modelo cuadrático de metodología de superficie, se evaluó mediante la prueba F y ANOVA, cuyos resultados se presentan en la Tabla 6.

El resultado de la prueba F de Fisher fue 75.53, con un valor p inferior a 0.0001, lo que demuestra que el modelo es altamente significativo. Además, el coeficiente de determinación (R^2) fue de 0.9895, lo que refleja una alta concordancia entre los valores experimentales y los predichos por el modelo. El R^2 ajustado alcanzó un valor de 0.9761, lo que indica que el modelo cuadrático logró predecir el 97.61 % de la variación en la extracción de cafeína. Por otra parte, la falta de ajuste no resultó estadísticamente significativa, con un valor F de 1.37 y un valor p de 0.3733. Estos resultados indican que la falta de ajuste no tuvo un impacto significativo en los resultados

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

obtenidos. Las representaciones gráficas de la ecuación cuadrática generadas por el software Design-Expert se muestran mediante una superficie de respuesta en 3D (Figura 3A) y gráficos de contorno en 2D (Figura 3B). Los niveles óptimos de las variables investigadas se determinaron a partir del análisis de estas gráficas.

Tabla 6. ANOVA para el modelo cuadrático de la MSR.

Cafeína	**Suma de cuadrados**	**gl**	**Cuadrado medio**	**Valor F**	**Valor P**	
Modelo	6.30	9	0.7001	73.53	< 0.0001	Significativo
A-Tiempo	0.1891	1	0.1891	19.86	0.0029	
B-Ac. cítrico	2.89	1	2.89	303.76	< 0.0001	
C-Amplitud	1.30	1	1.30	136.13	< 0.0001	
AB	0.0081	1	0.0081	0.8508	0.3870	
AC	0.0132	1	0.0132	1.39	0.2771	
BC	0.3192	1	0.3192	33.53	0.0007	
A^2	0.0762	1	0.0762	8.00	0.0255	
B^2	1.44	1	1.44	151.09	< 0.0001	
C^2	0.0637	1	0.0637	6.69	0.0361	
Residual	0.0666	7	0.0095			
Falta de ajuste	0.0337	3	0.0112	1.37	0.3733	No Significativo
Error puro	0.0329	4	0.0082			

$R^2 = 0.9895$; $R^2 ajustado = 0.9761$; $R^2 previsto = 0.9071$

El contenido de cafeína presente en las hojas secas de *I. guayusa* ha sido objeto de diversas investigaciones, con resultados que muestran variabilidad en la concentración de este compuesto. En un estudio reciente de Luna-Fox y cols. (2024), se reportaron niveles de cafeína que variaron entre 0.24 % y 1.52 % en extractos acuosos obtenidos mediante la técnica de extracción asistida por ultrasonido. Sin embargo, Cadena-Carrera y cols. (2022) encontraron un rendimiento superior (2.27 ± 0.05 %) utilizando etanol como disolvente y la técnica de extracción con fluidos supercríticos. Esta diferencia en los valores obtenidos puede atribuirse a varios factores, tales como el tipo de técnica de extracción, el disolvente utilizado, el tamaño de partícula del material vegetal y las condiciones ambientales. Investigaciones previas han indicado que variables como las condiciones climáticas y las características del suelo, como se observó en los estudios de Repajić y cols. (2021) y Mazumder y cols. (2020), también juegan un papel crucial en la concentración de compuestos bioactivos, lo que demuestra la complejidad de los factores que afectan la extracción de estos compuestos.

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

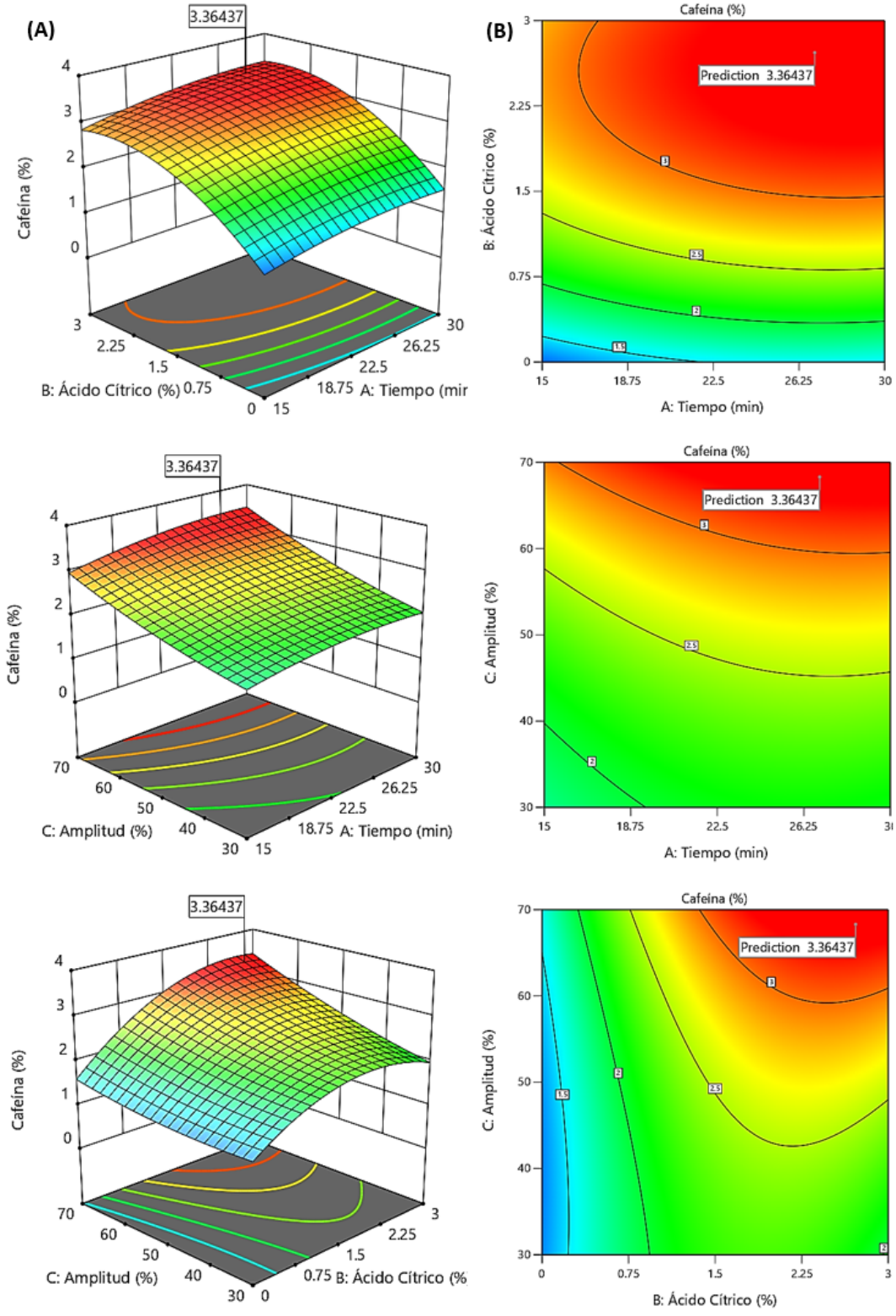


Figura 3. Condiciones óptimas de extracción de cafeína. Gráficos de superficie de respuesta (A), gráficos de contorno (B).

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

3.3 Parámetros fisicoquímicos del extracto liofilizado

El producto liofilizado se elaboró a partir del extracto acuoso obtenido en las condiciones óptimas de extracción definidas por el modelo cuadrático de la MSR. El extracto liofilizado fue procesado para asegurar que cumpliera con las especificaciones establecidas en la normativa NTE INEN 1122:2013 (2013) para el café liofilizado, la cual regula parámetros clave como el pH, la humedad, el contenido de cenizas totales y la solubilidad en agua caliente y fría.

En este estudio, los resultados obtenidos para cada uno de estos parámetros se ajustaron a las especificaciones de la normativa NTE INEN 1122:2013 (2013) (Tabla 7). El pH del extracto liofilizado fue de 5.1 $\pm$ 0.2, lo que se encuentra dentro del rango permitido. La humedad fue de 1.2 $\pm$ 0.1%, muy por debajo del límite máximo de 3.5%, lo que indica un buen proceso de liofilización que asegura una baja actividad acuosa y una mayor estabilidad del producto. El contenido de cenizas totales fue de 11.87 $\pm$ 0.12%, lo que refleja una correcta calidad del extracto sin presencia excesiva de impurezas minerales. En cuanto a la solubilidad, el extracto liofilizado mostró una buena capacidad de disolución, con un tiempo de solubilidad en agua caliente de 17 $\pm$ 1.0 s y en agua fría de 1.8 $\pm$ 0.2 min, valores que están por debajo de los límites establecidos por la normativa. Estos resultados reflejan la alta calidad del extracto liofilizado obtenido en las condiciones de extracción óptimas. Este cumplimiento normativo es un indicador importante de la idoneidad del proceso de extracción y liofilización, y sugiere que el extracto liofilizado producido tiene características que lo hacen adecuado para su comercialización y consumo, garantizando estándares de calidad y seguridad para el consumidor final.

Tabla 7. Parámetros fisicoquímicos aceptables según la NTE INEN 1122:2013 (2013).

Análisis	**Extracto liofilizado de** *I. guayusa*	**Café liofilizado**	
		Mínimo	**Máximo**
H (%)	1.2±0.1	-	3.5
CT (%)	11.87±0.12	-	14
pH	5.1±0.2	4.7	5.5
SC (s)	17±1	-	30
SF (min)	1.8±0.2	-	3

H: humedad, CT: cenizas totales, SC: solubilidad en agua caliente, SF: solubilidad en agua fría

3.4 Contenido de metales pesados en el extracto liofilizado

La normativa NTE INEN 1122:2013 (2013) establece límites específicos para la presencia de metales pesados en el café liofilizado, con el fin de garantizar la seguridad y calidad del producto. Estos valores fueron utilizados como referencia para evaluar el contenido de metales pesados en el extracto liofilizado de *I. guayusa* en este estudio.

Los resultados obtenidos demostraron que el contenido de metales pesados en el extracto liofilizado cumplió estrictamente con los límites establecidos por la normativa (Tabla 8). En particular, los niveles de zinc, cobre y estaño fueron de 19.16±0.04 mg/kg, 12.35±0.23 mg/kg y 8.64±0.17 mg/kg, respectivamente, todos por debajo del límite máximo permitido. Además, no se detectó la presencia de plomo, cadmio ni arsénico, lo que resalta la calidad y seguridad del producto.

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Tabla 8. Valores máximos aceptables de metales pesados según la NTE INEN 1122:2013 (2013).

Metal analizado	Extracto liofilizado de *I. guayusa* (mg/kg)	Café liofilizado (mg/kg)
Pb	ND	1
Cd	ND	0.1
Zn	19.16±0.04	50
Cu	12.35±0.23	20
As	ND	0.5
Sn	8.64±0.17	20

Pb: plomo, Cd: cadmio, Zn: zinc, Cu: cobre, As: arsénico, Sn: estaño, ND: no detectado.

Diferentes estudios han indicado que la presencia de estos metales puede tener efectos tóxicos y acumulativos en el organismo. El plomo, por ejemplo, es un neurotóxico que puede afectar el sistema nervioso central, provocando trastornos cognitivos y de comportamiento, especialmente en niños (Sobin y cols., 2023). El cadmio se acumula principalmente en los riñones y puede causar daño renal, además de estar asociado con un mayor riesgo de cáncer en los pulmones y otros órganos (Howard y cols., 2023). En cuanto al arsénico, su exposición prolongada puede provocar problemas en la piel, el sistema respiratorio y aumentar el riesgo de desarrollar cáncer (Chappells y Dummer, 2024). Por otro lado, Yan y cols. (2023) han indicado que el zinc, aunque es esencial en pequeñas cantidades para la salud, en niveles elevados puede interferir con la absorción de otros minerales y causar efectos adversos como náuseas, vómitos y disfunción hepática. El cobre, por su parte, es vital para funciones biológicas, pero en concentraciones altas puede dañar el hígado y el sistema nervioso (Min y cols., 2024). El estaño, aunque menos estudiado, en concentraciones altas puede causar malestares gastrointestinales y afectar la función renal (Liu y cols., 2022). En este estudio la ausencia de plomo, cadmio, arsénico y la baja concentración de zinc, cobre y estaño en el extracto liofilizado de *I. guayusa* destacan la seguridad y calidad del producto, minimizando cualquier riesgo para la salud de los consumidores.

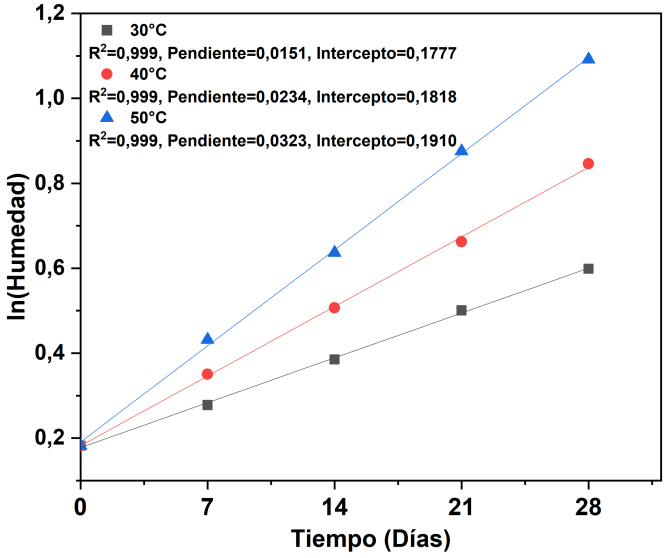


Figura 4. Relación entre ln (humedad) en función del tiempo de almacenamiento (días) del extracto liofilizado de *I. guayusa* a 30, 40 y 50 °C.

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

3.5 Determinación de la vida útil

La relación entre el contenido de humedad del extracto liofilizado y el tiempo se calculó mediante la gráfica del ln (humedad) en función del tiempo, de acuerdo con la Ecuación 4 (Figura 4). Los resultados mostraron un comportamiento consistente con una reacción de primer orden, lo cual fue confirmado por un coeficiente de determinación (R^2) de 0.999 para las curvas obtenidas a 30, 40 y 50 °C (Tabla 9). La constante de reacción cinética (k) estuvo representada por la pendiente de la recta en cada caso.

Tabla 9. Valores de k para las temperaturas de almacenamiento.

Temperatura (°C)	R^2	k	Intercepto
30	0.999	0.0151	0.1777
40	0.999	0.0234	0.1818
50	0.999	0.0323	0.1910

K: constante de reacción cinética

La temperatura tuvo una fuerte influencia en la constante de reacción cinética, reflejada en un aumento proporcional de su valor conforme se incrementaba la temperatura. Este comportamiento puede explicarse por el aumento en la energía cinética de las moléculas reaccionantes, lo que favorece un mayor número de colisiones efectivas, superando la barrera energética del proceso químico (Karal y cols., 2024). Esta tendencia es coherente con la ecuación de Arrhenius, la cual establece que la constante de reacción depende exponencialmente de la temperatura.

Resultados similares se reportaron por Isuiza y cols. (2018), quienes documentaron un incremento proporcional en la constante de reacción al aumentar la temperatura en procesos cinéticos similares. Estos autores concluyeron que este fenómeno era atribuible a la disminución de la energía de activación y al favorecimiento de la dinámica molecular del sistema.

La ecuación de Arrhenius linealizada se utilizó para calcular la energía de activación (Ea) y la constante de reacción cinética a una temperatura de 20 °C, con el fin de estimar la vida útil del extracto liofilizado. En la Figura 5 se presenta la relación entre el ln(k) y el inverso de la temperatura absoluta, donde los datos mostraron un buen ajuste, con un R^2 de 0.995.

La vida útil a 20 °C se calculó utilizando la Ecuación 4, tomando como parámetro crítico a la humedad según la normativa NTE INEN 1122:2013 (2013) para café liofilizado, que establece un límite máximo de humedad del 3.5%. La vida útil estimada se detalla en la Tabla 10.

Tabla 10. Energía de activación, constante de reacción cinética a 20 °C y vida útil del extracto liofilizado.

Ea (kJ/mol)	k_0	k_{20}	H_0 (%)	$H_{máx}$ (%)	$t_{20°C}$ (días)	$t_{20°C}$ (meses)	Ecuación de orden uno empleada
30.097	3 361.02	0.0101	1.2	3.5	106	3.5	$\ln(H) = \ln(H_0) + kt$

Ea: energía de activación, k_0: factor pre-exponencial, $k_{20°C}$: constante de reacción cinética a 20 °C, H_0: humedad inicial del extracto liofilizado, $H_{máx}$: humedad máxima aceptable, $t_{20°C}$: tiempo de vida útil del extracto liofilizado.

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

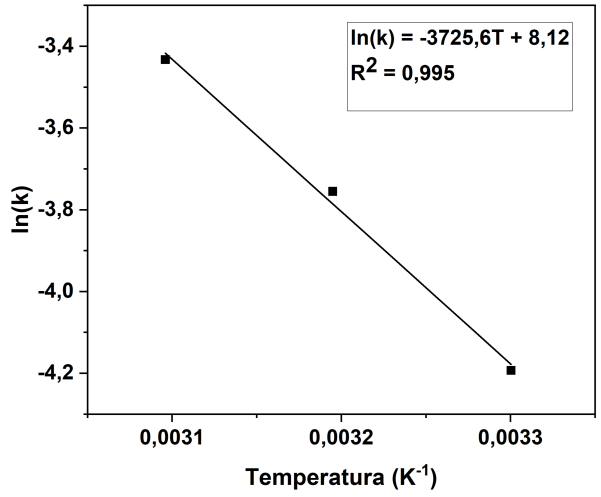


Figura 5. Relación entre la constante de reacción cinética (k) y el inverso de la temperatura absoluta.

Actualmente, no se han identificado investigaciones previas que determinan la energía de activación y la vida útil de un producto liofilizado a partir de extractos acuosos de hojas secas de *I. guayusa*.

Sin embargo, los estudios realizados en otros productos liofilizados ofrecen un marco de referencia para comparar los resultados obtenidos. Isuiza y cols. (2018) y López-Quiroga y cols. (2019) reportaron valores de energía de activación que oscilan entre 18.3 y 31.35 kJ/mol, un rango dentro del cual se encuentra la energía de activación determinada para el producto liofilizado de *I. guayusa* en este estudio. Este resultado indica un comportamiento energético comparable con otros productos liofilizados de origen vegetal.

En relación con la vida útil, los 106 días estimados para el extracto liofilizado de *I. guayusa* son similares a los reportados por González-Pérez y cols. (2024) para un producto elaborado a base de manzana (105 días). Este hallazgo posiciona al extracto de liofilizado de *I. guayusa* como un producto competitivo en términos de estabilidad durante el almacenamiento. Setiawan y cols. (2022) determinó una vida útil menor (59 días) para una bebida liofilizada a base de coco, lo que resalta la variabilidad en los tiempos de conservación entre productos liofilizados y pone en evidencia la influencia de factores como la composición química, los métodos de procesamiento y los materiales de embalaje.

Los resultados de esta investigación proporcionan un punto de partida para futuras investigaciones que busquen optimizar la estabilidad del liofilizado de *I. guayusa* y extender su tiempo de almacenamiento. Además, este estudio contribuye a llenar un vacío en la literatura, estableciendo parámetros clave para el desarrollo de productos innovadores a base de *I. guayusa*.

4 Conclusiones

La concentración de ácido cítrico fue el factor que más influyó en la extracción de cafeína a partir de hojas secas de *I. guayusa*, seguido de la amplitud ultrasónica y el tiempo de extracción. La relación sólido-líquido no mostró un efecto significativo.

Se elaboró un liofilizado a partir del extracto acuoso de *I. guayusa* obtenido bajo las condiciones óptimas de extracción. El producto final cumplió con los parámetros fisicoquímicos y los límites de metales pesados establecidos en la normativa NTE INEN 1122:2013 (2013).

Los resultados de la presente investigación brindan información valiosa para el desarrollo de un producto liofilizado rico en cafeína natural, posicionándolo como una alternativa potencial a los productos que utilizan cafeína sintética. Es necesario estudiar la estabilidad a largo plazo del producto

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

bajo diversas condiciones de almacenamiento para su viabilidad comercial.

Declaración de uso de inteligencia artificial

Los autores DECLARAN que, durante la preparación del artículo titulado «Extracto liofilizado de *Ilex guayusa*: potencial ingrediente para bebidas energizantes», no se utilizaron herramientas de inteligencia artificial generativa ni sistemas automatizados de asistencia para la redacción, análisis, interpretación de datos, generación de contenido, traducción o edición del manuscrito.

Los autores asumen plena responsabilidad por el contenido, la originalidad, la integridad y la versión final del artículo.

Contribución de los autores

L.S.: Conceptualización, Investigación, Escritura – borrador original, Escritura – revisión y edición. **S.L.F.:** Análisis formal, Escritura – borrador original. **M.R.:** Metodología, Administración de Proyecto, Escritura – borrador original, Escritura – revisión y edición.

Referencias

Abreu-Naranjo, R., Arteaga-Crespo, Y., Bravo-Sanchez, L. R., Pérez-Quintana, M. L., y García-Quintana, Y. (2018). Response surface methodology for optimisation of total polyphenol content and antioxidant activity of extracts from Maytenus macrocarpa bark by means of ultrasound-assisted extraction. *Wood Science And Technology*, *52*(5), 1359–1376. Online: https://doi.org/10.1007/s00226-018-1034-x

Anderson, M. J., y Whitcomb, P. J. (2016). *RSM simplified*. Productivity Press eBooks. Online: https://doi.org/10.1201/9781315382326

Arteaga-Crespo, Y., Radice, M., Bravo-Sanchez, L. R., García-Quintana, Y., y Scalvenzi, L. (2019). Optimisation of ultrasound-assisted extraction of phenolic antioxidants from Ilex guayusa Loes. leaves using response surface methodology. *Heliyon*, *6*(1), e03043. Online: https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e03043

Cadena-Carrera, S., Tramontin, D. P., Cruz, A. B., Cruz, R. C. B., Müller, J. M., y Hense, H. (2019). Biological activity of extracts from guayusa leaves (Ilex guayusa Loes.) obtained by supercritical CO2 and ethanol as cosolvent. *The Journal of Supercritical Fluids*, *152*, 104543. Online: https://doi.org/10.1016/j.supflu.2019.104543

Cadena-Carrera, S., Tramontin, D. P., Jacques, R., Scapin, E., Müller, J. M., y Hense, H. (2022). Green-based methods to obtain bioactive compounds from Ilex guayusa Loes. using polar solvent. *Natural Product Research*, *37*(18), 3103–3108. Online: https://doi.org/10.1080/14786419.2022.2140802

Cakmak, H., Ilyasoglu-Buyukkestelli, H., Sogut, E., Ozyurt, V. H., Gumus-Bonacina, C. E., y Simsek, S. (2023). A review on recent advances of plant mucilages and their applications in food industry: Extraction, functional properties and health benefits. *Food Hydrocolloids for Health*, *3*, 100131. Online: https://doi.org/10.1016/j.fhfh.2023.100131

Carreira-Casais, A., Otero, P., Garcia-Perez, P., Garcia-Oliveira, P., Pereira, A. G., Carpena, M., … Prieto, M. A. (2021). Benefits and drawbacks of ultrasound-assisted extraction for the recovery of bioactive compounds from marine algae. *International Journal Of Environmental Research And Public Health*, *18*(17), 9153. Online: https://doi.org/10.3390/ijerph18179153

Chappells, H., y Dummer, T. (2024). Situating people and place in cancer prevention: Arsenic in drinking water in global to local context. En *Global perspectives on health geography* (pp. 243–267). Springer. Online: https://doi.org/10.1007/978-3-031-66413-7_10

Chianese, G., Golin-Pacheco, S., Taglialatela-Scafati, O., Collado, J., Munoz, E., Appendino, G., y Pollastro, F. (2019). Bioactive triterpenoids from the caffeine-rich plants guayusa and maté. *Food Research International*, *115*, 504–510. Online: https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.10.005

Dinardo, A., Brar, H. S., Subramanian, J., y Singh, A. (2019). Optimization of microwave-assisted ex-

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

traction parameters and characterization of phenolic compounds in yellow european plums. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, *97*, 256–267. Online: https://doi.org/10.1002/cjce.23237

García-Ruiz, A., Baenas, N., Benítez-González, A. M., Stinco, C. M., Meléndez-Martínez, A. J., Moreno, D. A., y Ruales, J. (2017). Guayusa (Ilex guayusa L.) new tea: phenolic and carotenoid composition and antioxidant capacity. *Journal Of The Science Of Food And Agriculture*, *97*(12), 3929–3936. Online: https://doi.org/10.1002/jsfa.8255

González-Pérez, J. E., Jiménez-González, O., Romo-Hernández, A., Lóp-Malo, A., y Ramírez-Corona, N. (2024). Time-to-failure approach for estimating the shelf life of freeze-dried carotenoid-enriched apples: Forecasting the deterioration of quality properties for different packaging types and storage conditions. *ACS Agricultural Science & Technology*, *4*(11), 1241–1249. Online: https://doi.org/10.1021/acsagscitech.4c00465

Hassan, S., y Yaqoobi, A. A. (2023). Assessment of ultrasound-assisted extraction of caffeine and its bioactivity. *Journal Of Ecological Engineering*, *24*(3), 126–133. Online: https://doi.org/10.12911/22998993/157540

Held, S., Hildenbrand, A., Herdt, A., y Wachtmeister, G. (2023). Multiobjective metamodel-based design optimization—a review and classification approach using the example of engine development. *SAE Technical Papers*. Online: https://doi.org/10.4271/2023-01-5026

Herrera, D. C. V., Mallea, C. L. B., Del Rosario Crisosto Fuster, A., y Marin, C. A. H. (2022). Estabilidad de bebida funcional de suero deslactosado con Passiflora mollissima en condiciones termales: Un estudio de vida útil. *Revista de Ingeniería (UPT)*. Online: https://revistas.upt.edu.pe/ojs/index.php/ingenieria/article/view/648

Howard, J. A., Kuznietsova, H., Dziubenko, N., Aigle, A., Natuzzi, M., Thomas, E., … Tillement, O. (2023). Combating lead and cadmium exposure with an orally administered chitosan-based chelating polymer. *Scientific Reports*, *13*(1). Online: https://doi.org/10.1038/s41598-023-28968-4

Isuiza, G. G. P., Perez, J. F. L., Sánchez, I. C., Olano, J. C., Valerio, W. F. S., y Delgado, L. F. V. (2018). Vida en anaquel de galletas saladas utilizando pruebas aceleradas. *Anales Científicos*, *79*(1), 218. Online: https://doi.org/10.21704/ac.v79i1.1166

Ivanović, M., Razboršek, M. I., y Kolar, M. (2020). Innovative extraction techniques using deep eutectic solvents and analytical methods for the isolation and characterization of natural bioactive compounds from plant material. *Plants*, *9*(11), 1428. Online: https://doi.org/10.3390/plants9111428

Karal, M. A. S., Billah, M. M., y Ahamed, M. K. (2024). Determination of pore edge tension from the kinetics of rupture of giant unilamellar vesicles using the arrhenius equation: effects of sugar concentration, surface charge and cholesterol. *Physical Chemistry Chemical Physics*, *26*(7), 6107–6117. Online: https://doi.org/10.1039/d3cp04451c

Kumar, K., Srivastav, S., y Sharanagat, V. S. (2020). Ultrasound assisted extraction (UAE) of bioactive compounds from fruit and vegetable processing by-products: A review. *Ultrasonics Sonochemistry*, *70*, 105325. Online: https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105325

Lezoul, N. E. H., Belkadi, M., Habibi, F., y Guillén, F. (2020). Extraction processes with several solvents on total bioactive compounds in different organs of three medicinal plants. *Molecules*, *25*(20), 4672. Online: https://doi.org/10.3390/molecules25204672

Liu, Y., Wang, S., Niu, X., Yin, M., He, Z., Hou, J., … Luo, Y. (2022). Vertical distribution and health risk assessment of heavy metals in soils around tin ore areas in yunnan, china. *International Journal Of Environmental & Analytical Chemistry*, 1–14. Online: https://doi.org/10.1080/03067319.2022.2128794

López-Quiroga, E., Prosapio, V., Fryer, P. J., Norton, I. T., y Bakalis, S. (2019). Model discrimination for drying and rehydration kinetics of freeze-dried tomatoes. *Journal Of Food Process Engineering*, *43*(5). Online: https://doi.org/10.1111/jfpe.13192

Luna-Fox, S., Uvidia-Armijo, J. H., y Rivera-Barreto, J. (2024). Kinetic study of solid-liquid extraction

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

of caffeine in Ilex guayusa Loes. *Revista de la Facultad de Agronomía (LUZ)*, *41*(3), e244128. Online: https://doi.org/10.47280/RevFacAgron(LUZ).v41.n3.08

Mazumder, K., Nabila, A., Aktar, A., y Farahnaky, A. (2020). Bioactive variability and in vitro and in vivo antioxidant activity of unprocessed and processed flour of nine cultivars of australian lupin species: A comprehensive substantiation. *Antioxidants*, *9*(4), 282. Online: https://doi.org/10.3390/antiox9040282

Meneses, M. Á., Guzmán, J., Cabrera, J., Magallanes, J., Valarezo, E., y Guamán-Balcázar, M. D. C. (2024). Green processing of Ilex guayusa: Antioxidant concentration and caffeine reduction using encapsulation by supercritical antisolvent process. *Molecules*, *29*(22), 5309. Online: https://doi.org/10.3390/molecules29225309

Min, J., Sarlus, H., y Harris, R. A. (2024). Copper toxicity and deficiency: the vicious cycle at the core of protein aggregation in ALS. *Frontiers In Molecular Neuroscience*, *17*. Online: https://doi.org/10.3389/fnmol.2024.1408159

Negrin, A., Long, C., Motley, T. J., y Kennelly, E. J. (2019). LC-MS metabolomics and chemotaxonomy of caffeine-containing holly (Ilex) species and related taxa in the Aquifoliaceae. *Journal Of Agricultural And Food Chemistry*, *67*(19), 5687–5699. Online: https://doi.org/10.1021/acs.jafc.8b07168

Repajić, M., Cegledi, E., Zorić, Z., Pedisić, S., Garofulić, I. E., Radman, S., … Dragović-Uzelac, V. (2021). Bioactive compounds in wild nettle (Urtica dioica L.) leaves and stalks: Polyphenols and pigments upon seasonal and habitat variations. *Foods*, *10*(1), 190. Online: https://doi.org/10.3390/foods10010190

Serna-Jiménez, J., Torres-Valenzuela, L., Villarreal, A. S., Roldan, C., Martín, M., Siles, J., y Chica, A. (2023). Advanced extraction of caffeine and polyphenols from coffee pulp: Comparison of conventional and ultrasound-assisted methods. *LWT*, *177*, 114571. Online: https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.114571

Servicio Ecuatoriano de Normalización (INEN). (2013). *NTE INEN 1122:2013 – requisitos del café soluble* (Inf. Téc.). Servicio Ecuatoriano de Normalización. Online: https://www.bing.com/search?q=NTE+INEN+1122%3A2013

Setiawan, B., Azra, J. M., Nasution, Z., Sulaeman, A., y Estuningsih, S. (2022). Development of freeze-dried coconut drink and its nutrient content, sensory profile, and shelf life. *Journal Of Culinary Science & Technology*, *22*(4), 787–803. Online: https://doi.org/10.1080/15428052.2022.2079578

Sobin, C., Gutiérrez-Vega, M., Flores-Montoya, G., Del Rio, M., Alvarez, J. M., Obeng, A., … Hettiarachchi, G. (2023). Improving equitability and inclusion for testing and detection of lead poisoning in US children. *Milbank Quarterly*, *101*(1), 48–73. Online: https://doi.org/10.1111/1468-0009.12596

Yan, H., Li, S., Zhong, J., y Li, B. (2023). An electrochemical perspective of aqueous zinc metal anode. *Nano-Micro Letters*, *16*(1). Online: https://doi.org/10.1007/s40820-023-01227-x

Yang, Y., Guan, M., Fang, M., Gu, Y., Yi, L., y Ren, D. (2024). Simultaneous extraction and selective separation of catechins, caffeine and theanine from waste tea residue facilitated by citric acid-based deep eutectic solvent. *Separation And Purification Technology*, 130918. Online: https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.130918

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

La Granja: Revista de Ciencias de la Vida
pISSN:1390-3799; eISSN:1390-8596
https://doi.org/10.17163/lgr.n44.2026.06

Artículo científico / Scientific paper

Biotecnología

Potencial antimicrobiano del extracto fluido de *Vaccinium floribundum* frente a *Staphylococcus saprophyticus* causante de infecciones de vías urinarias

Antimicrobial potential of *Vaccinium floribundum* extract fluid against *Staphylococcus saprophyticus* causing urinary tract infections

Johana Meneses*, Stephanie Moncayo, María E. Maldonado y Ramiro Acurio

*Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador. [*https://ror.org/00f11af73*]*

*Autor para correspondencia: jmeneses@ups.edu.ec

Manuscrito recibido el 26 de octubre de 2024. Aceptado, tras revisión el 06 de noviembre de 2025. Publicado el 1 de septiembre de 2026.

Resumen

Se evaluó *Vaccinium floribundum*, de la familia Ericaceae, por sus propiedades antimicrobianas, antioxidantes, antiinflamatorias y anticancerígenas, debido a su alto contenido de antocianinas. El objetivo de este estudio es determinar la cantidad de antocianinas presentes en el extracto fluido de *V. floribundum*, así como evaluar la actividad antimicrobiana en la prevención de infecciones del tracto urinario (IVU), estableciendo la concentración mínima inhibitoria (MIC) frente a *Staphylococcus saprophyticus* ATCC 15305, causante de infecciones urinarias. El estudio se realizó en los Laboratorios de Ciencias de la Vida de la Universidad Politécnica Salesiana, iniciando con la obtención de extractos etanólicos al 20 y 50 % a partir de frutos recolectados en la provincia de Cotopaxi, cantón Sigchos; los ensayos fueron aplicados a nivel *in vitro*. Se cuantificó la concentración de fenoles totales por el método de Folin-Ciocalteu, obteniendo 537.26 mg AG/100 mL de extracto al 20 % y 621.04 mg AG/100 mL al 50 %. En la cuantificación de antocianinas totales se obtuvieron 11.6391 mg/L de extracto al 20 % y 43.63 mg/L al 50 %, respectivamente. Posteriormente, se evaluó la concentración mínima inhibitoria (MIC) y el porcentaje de inhibición de los extractos frente a *S. saprophyticus*; la MIC fue de 390.63 μg/mL para ambos extractos, con un 88.42 % de inhibición para el extracto al 20 % y un 88.44 % para el extracto al 50 %. Mediante cromatografía en capa fina (TLC), los factores de retención (R_f) fueron: 0.42 (cianidina 3-*O*-glucósido), 0.62 (malvidina) y 0.86 (cianidina). En conclusión, los extractos etanólicos de *V. floribundum* al 20 y 50 % presentan actividad antimicrobiana frente a *S. saprophyticus*.

Palabras clave: Control microbiano, Mortiño, *Vaccinium floribundum*, extractos etanólicos, antocianinas.

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Abstract

Vaccinium floribundum, belonging to the Ericaceae family, was evaluated for its antimicrobial, antioxidant, anti-inflammatory, and anticancer properties due to its high anthocyanin content. The objective of this study was to determine the content of anthocyanins present in the fluid extract of *V. floribundum*, as well as to evaluate its antimicrobial activity in the prevention of UTIs, establishing the minimum inhibitory concentration (MIC) against *Staphylococcus saprophyticus* ATCC 15305, a causative agent of urinary tract infections. The study was conducted at the Life Sciences Laboratories of the Salesian Polytechnic University, beginning with the preparation of 20% and 50% ethanolic extracts from fruits harvested in the Province of Cotopaxi, Sigchos Canton; the assays were performed *in vitro*. The concentration of total phenols was quantified using the Folin-Ciocalteu method, yielding 537.26 mg AG/100 mL for the 20% extract and 621.04 mg AG/100 mL for the 50% extract. In the quantification of total anthocyanins, 11.6391 mg/L was obtained for the 20% extract and 43.63 mg/L for the 50% extract, respectively. Subsequently, the minimum inhibitory concentration (MIC) and the percentage of inhibition were evaluated for the extracts against *S. saprophyticus*; the MIC was 390.63 μg/mL for both extracts, with 88.42% inhibition for the 20% extract and 88.44% for the 50% extract. Using thin-layer chromatography (TLC), the retention factors (R_f) were 0.42 (cyanidin 3-*O*-glucoside), 0.62 (malvidin), and 0.86 (cyanidin). In conclusion, the 20% and 50% ethanolic extracts of *V. floribundum* exhibit antimicrobial activity against *S. saprophyticus*.

Keywords: Microbial control, Mortiño, *Vaccinium floribundum*, ethanolic extracts, anthocyanins.

Forma sugerida de citar: Meneses, J., Moncayo, S., Maldonado, M. E. y Acurio, R. (2026). Potencial antimicrobiano del extracto fluido de *Vaccinium floribundum* frente a *Staphylococcus saprophyticus* causante de infecciones de vías urinarias. *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida.* Vol. 44(2):99-115. https://doi.org/10.17163/lgr.n44.2026.06.

Orcid IDs:

Johana Gabriela Meneses Morillo: https://orcid.org/0000-0001-9920-959X
Stephanie Abigail Moncayo Picerno: https://orcid.org/0000-0003-1614-0676
María Elena Maldonado Rodríguez: https://orcid.org/0000-0003-3658-5445
Ramiro Daniel Acurio Vásconez: https://orcid.org/0000-0002-2305-4349

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

1 Introducción

Vaccinium floribundum, conocido comúnmente como mortiño en Ecuador, es un arbusto silvestre de la familia Ericaceae perteneciente al género *Vaccinium*, el cual se distribuye entre los 3400 y 3800 msnm en la región andina. Al ser una especie perenne que habita en un ecosistema considerado sensible, actualmente no cuenta con un método de propagación que garantice uniformidad vegetal. No obstante, posee una amplia variedad de compuestos fenólicos y altas concentraciones de antocianinas en forma de pigmentos en sus bayas, hojas, flores y frutos, caracterizadas por presentar una aglicona y una sustitución glucosídica en la posición 3 (Llerena y cols., 2004; Pérez y cols., 2020).

Estudios recientes demuestran que las sustancias activas presentes en los frutos de mortiño, tales como la fructosa y las proantocianidinas, actúan impidiendo la adhesión de bacterias uropatógenas (como *Escherichia coli*) al urotelio en mujeres, aunque este efecto no se replica de la misma manera en pacientes con vejiga neurogénica. Por esta razón, se recomienda el uso de esta especie vegetal como agente preventivo en patologías urológicas (De León y cols., 2009). Dentro de las Infecciones del Tracto Urinario (ITU), se clasifica formalmente a la Infección de Vías Urinarias (IVU), cuya ocurrencia se sitúa entre el 1 y el 3% en adolescentes en edad escolar, incrementándose de forma significativa con el inicio de la actividad sexual y manifestando una alta prevalencia en mujeres de entre 20 y 50 años. Según estadísticas del Ministerio de Salud Pública (2013), 4 de cada 10 habitantes reportaron infecciones en las vías urinarias durante el año 2009. Asimismo, en el año 2019, el Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC) reportó un total de 9916 casos de infecciones de vías genitourinarias en el grupo etario femenino de 18 a 29 años, de los cuales el 9.0% se registraron en la región Sierra y el 7.2% en la región Costa (Instituto Nacional de Estadística y Censos, 2019; Palacio Rojas y cols., 2018; Rengifo, 2013).

Al correlacionar el género *Vaccinium* con la actividad antimicrobiana en la prevención de infecciones del tracto urinario, se ha determinado que la acción de *V. floribundum* está estrechamente relacionada con la presencia de glucósidos de flavonol y polifenoles, tales como proantocianidinas, antocianinas y flavan-3-oles (Baenas y cols., 2020). Esta acción biológica se puede comprobar mediante el análisis de la Concentración Mínima Inhibitoria (MIC) a través de la técnica de diluciones seriadas en placas estériles. Este procedimiento expone concentraciones definidas de un extracto frente a diversos microorganismos para identificar el crecimiento más bajo y calcular su respectivo porcentaje de inhibición. Para la ejecución de esta técnica, es indispensable emplear colorantes químicos estables; entre ellos destaca el cloruro de 2,3,5-trifeniltetrazolio (TTC) al 1%, el cual es reducido por la actividad metabólica celular formando sales de formazán. Esto permite la detección visual de las colonias microbianas mediante un viraje de incoloro a rojizo, evaluable a una longitud de onda de 450 nm (Condalab, 2019; Hemeg y cols., 2020).

Para alcanzar los objetivos analíticos, es necesario cuantificar la concentración de fenoles totales en las muestras de *V. floribundum*. Con este fin, los extractos fluidos de mortiño preparados al 20 y 50% de etanol se evalúan de forma colorimétrica mediante el reactivo de Folin-Ciocalteu (F-C), utilizando ácido gálico como estándar de calibración. El reactivo de F-C se caracteriza por constituir complejos fosfomolíbdicos-fosfotúngsticos que, tras la formación de óxidos cromógenos en un medio con pH básico, sufren una reducción química y generan una coloración azul. La medición se realiza en un espectrofotómetro ultravioleta-visible (UV-Vis) para registrar la absorbancia de los compuestos fenólicos reducidos, siendo esta absorbancia directamente proporcional a la concentración del analito (Cortez y cols., 2018). Posteriormente, se determina la concentración de antocianinas monoméricas empleando el método de pH diferencial, evaluando las lecturas espectrofotométricas a las longitudes de onda máximas de 520 y 700 nm (Zapata y cols., 2014).

Con el propósito de separar las fracciones químicas de los extractos crudos de mortiño, se utiliza la técnica de cromatografía en capa fina (TLC), considerando al factor de retención (R_f) como un parámetro fundamental para identificar la naturaleza de los compuestos bioactivos separados. En esta matriz, dichos compuestos corresponden principalmente a derivados glicosilados de antocianinas, entre los que figuran la pelargonidina, cianidina, delfinidina, peonidina, petunidina y malvidina (Zapata

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

y cols., 2014). La técnica de TLC comprende una fase estacionaria de sílice gel (placas de 10×10 cm con indicador fluorescente a 254 nm) y una fase móvil compuesta por solventes de polaridad media en diversas proporciones. Los perfiles cromatográficos de los extractos de mortiño se comparan con un estándar de cianidina 3-*O*-glucósido, el cual exhibe un R_f de referencia de 0.44 (Santacruz, 2017).

Por último, la obtención de los extractos fluidos se lleva a cabo mediante técnicas de secado y extracción por maceración, un proceso que consiste en someter la especie vegetal a humectación con el solvente durante varios días a una temperatura afín al bioactivo que se desea preservar (Urquizo, 2016), empleando como sistemas disolventes soluciones de etanol a concentraciones del 20 y 50 %.

El objetivo principal de este proyecto de investigación es determinar la concentración de compuestos fenólicos presentes en el extracto fluido de *Vaccinium floribundum* y evaluar su actividad antimicrobiana *in vitro*. Se procura, además, identificar los metabolitos secundarios presentes en *V. floribundum* que poseen potencial antimicrobiano de interés en el control de patógenos causantes de infecciones de vías urinarias, y determinar la concentración mínima inhibitoria (MIC) de los extractos de *V. floribundum* frente a *Staphylococcus saprophyticus*.

2 Materiales y Métodos

2.1 Obtención de los extractos etanólicos

Los frutos de *Vaccinium floribundum* se recolectaron en el cantón Sigchos de la provincia de Cotopaxi a 3023 msnm, cuyas coordenadas geográficas corresponden a S 00°42'42.6" y W 078°53'22.1". Los frutos clasificados y limpios se colocaron en bandejas de aluminio y se secaron a 40 °C en una estufa por 6 días. La materia seca se trituró y se colocaron 100 g en un matraz Erlenmeyer de 250 mL, hidratando con 200 mL de cada alcohol al 20 y 50 % respectivamente; la mezcla se llevó a agitación por 24 horas, se filtró y se concentró en un rotavapor hasta obtener un volumen final de 100 mL. Finalmente, los extractos se recogieron en envases ámbar para su posterior análisis (Narváez, 2016).

2.2 Cuantificación de fenoles totales

Se empleó el método colorimétrico de Folin-Ciocalteu (Urbano, 2016). Partiendo de una solución madre de ácido gálico con una concentración de 2000 ppm, se prepararon soluciones estándar a siete concentraciones distintas (100, 150, 200, 250, 300, 350 y 400 ppm). Se tomó 0.5 mL de cada una de las soluciones, se añadieron 3.95 mL de agua destilada y 0.25 mL del reactivo de Folin-Ciocalteu, dejándose reposar la mezcla por 2 minutos. Posteriormente, se agregó 0.75 mL de carbonato de sodio al 20 % (p/v) y se midió la absorbancia a una longitud de onda de 765 nm luego de 2 horas de reposo en total oscuridad.

Con los datos obtenidos se construyó la curva de calibración. A continuación, se prepararon las muestras tomando 0.5 mL de cada uno de los extractos etanólicos de *Vaccinium floribundum* al 20 y 50 %, procediendo de la misma manera que con los estándares de la curva de calibración. Para cuantificar la concentración de fenoles totales en los extractos (expresada en mg AG/100 mL de extracto), se utilizó la siguiente ecuación 1 (Varela y Musuña, 2020):

$$\text{Abs} = mx + b \tag{1}$$

Donde: x: valor de polifenoles totales expresado en equivalentes de ácido gálico (en mg/mL). Abs: valor de la absorbancia a 765 nm. m: pendiente de la recta. b: intercepto con el eje y (Urbano, 2016).

2.3 Cuantificación de antocianinas

Se aplicó el método de pH diferencial (Giusti y Wrolstad, 2001). Se prepararon los buffers pH 1 y pH 4.5, cuya composición detallada se describe en la Tabla 1.

Se aforaron por triplicado 2.5 mL de cada uno de los extractos etanólicos de mortiño al 20 y 50 % a un volumen final de 5 mL y se llevaron a ultrasonido por 30 minutos. Los extractos se filtraron en tubos Falcon protegidos de la luz con papel de aluminio, se ajustó el pH a 2.3 con HCl 2M y se dejó reposar en la oscuridad por 4 horas, aplicando ultrasonido por 5 minutos cada 2 horas. Transcurrido este tiempo, se centrifugaron los tubos a 3500 rpm por 30 minutos.

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Tabla 1. Preparación de los buffers empleados

Buffer	**Composición / Reactivos**
Buffer pH 1	0.076 g de cloruro de potasio en 40 mL de agua destilada.
Buffer pH 4.5	2.27 g de acetato de sodio en 40 mL de agua destilada.

A continuación, se tomó 0.5 mL del sobrenadante de cada tubo Falcon y se aforó a 5 mL con cada uno de los buffers preparados (pH 1 y pH 4.5) y se dejó en reposo por 45 minutos. Después, se agregaron 100 μL en una microplaca de 96 pocillos para medir las absorbancias a 510 y 700 nm. Aplicando las Ecuaciones 2 y 3, se determinó la concentración de antocianinas presente en cada extracto etanólico de *Vaccinium floribundum* (Giusti y Wrolstad, 2001; Kayima, 2012).

$$\Delta A = (A_{\lambda max} - A_{700})_{pH1.0} - (A_{\lambda max} - A_{700})_{pH4.5} \quad (2)$$

$$AT\left(\frac{\text{mg}}{\text{L}}\right) = \frac{\Delta A \times PM \times FD \times 1000}{\varepsilon \times 1} \quad (3)$$

Donde: ΔA: variación de absorbancia; $A_{\lambda max}$: absorbancia de la longitud de onda máxima; AT: antocianinas totales (unidades en mg/L); FD: factor de dilución; PM: peso molecular de la cianidina-3-glucósido (449.2 g/mol); 1000: factor de conversión de gramos a miligramos; ε: coeficiente de extinción molar de la cianidina-3-glucósido (26900 L/mol·cm) (Giusti y Wrolstad, 2001).

2.4 Determinación de la Concentración Mínima Inhibitoria (MIC)

Se reactivaron las cepas certificadas ATCC 15305 Microbiologics en presentación KWIK STIK de *Staphylococcus saprophyticus*, mediante hisopado y de perlas de cryobank en medio sólido y líquido Tripticasa Soya (TSA/TSB), y se incubaron por 24 horas a 37 °C a un pH de 7.3 ± 0.2.

Se obtuvo el *overnight* sembrando en caldo Müller-Hinton por 24 horas a 37 °C. Luego de este tiempo, se centrifugaron los tubos a 3500 rpm por 30 minutos, se desechó el sobrenadante y se agregaron 5 mL de solución fisiológica al 0.9% estéril, llevando la mezcla a vórtex por 3 minutos. Añadiendo pequeñas cantidades de la solución fisiológica, se ajustó a 0.5 en la escala de McFarland y se midió la absorbancia a 625 nm (debiendo situarse entre 0.08 y 0.2) para lograr una concentración de 10^8 UFC/mL.

Se preparó la solución del antibiótico comercial y natural a ser ensayados; adicionalmente, se diluyeron los extractos 1:10 hasta un aforo de 10 mL (Guzmán, 2018; Veloz, 2018). A continuación, con el material y el área de trabajo totalmente estériles, se procedió a realizar la siembra en la microplaca (León y cols., 2011), según se detalla en la Tabla 2.

La microplaca se incubó por 24 horas a 35 °C con agitación. Posterior al tiempo de incubación, se colocaron 30 μL de cloruro de 2,3,5-trifeniltetrazolio (TTC) al 1% en cada uno de los 96 pocillos de la microplaca y se incubó a 37 °C por 40 minutos; por último, se midió la absorbancia a 450 nm en un lector de microplacas.

Para determinar la Concentración Mínima Inhibitoria (MIC), se aplicó la Ecuación 4:

$$\%\text{Inhibición} = 100 - \left(\frac{A \times 100}{B}\right) \quad (4)$$

Donde: A: promedio de las absorbancias de las tres réplicas; B: absorbancia del control positivo (Rosales, 2018).

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Tabla 2. Diseño del contenido de cada pocillo de la microplaca para la determinación de la MIC

Tratamiento	Ubicación	Contenido
Blanco	Columna A12-H12	200 μL MC
Control negativo (C_E)	Columna A11-H11	200 μL MC
Control positivo (C_C)	Fila H9-H1	150 μL MC + 50 μL del inóculo
Muestras de extractos etanólicos	Filas A9-B9-C9	150 μL MC + 50 μL Ext + 50 μL inóculo
	Filas A8-A1/B8-B1/C8-C1	150 μL MC + 50 μL del inóculo. Dilución seriada
Control positivo (antibiótico)	Filas D9-E9	150 μL MC + 50 μL Antb + 50 μL inóculo
	Filas D8-D1/E8-E1	150 μL MC + 50 μL del inóculo. Dilución seriada
Control positivo (natural)	Fila F9-G9	150 μL MC + 50 μL sol. timol + 50 μL inóculo
	Filas F8-F1/G8-G1	150 μL MC + 50 μL del inóculo. Dilución seriada

Nota. MC: medio de cultivo; Ext: extracto; Antb: antibiótico. Los 50 μL restantes de cada dilución se descartan.
Fuente. (León y cols., 2011).

2.5 Separación de compuestos por Cromatografía de Capa Fina (TLC)

Previo a la separación de componentes mediante la técnica de Cromatografía de Capa Fina (TLC), se concentraron los extractos etanólicos de mortiño al 20 y 50% en un rotavapor por 2 horas; a continuación, empleando un sistema de reflujo, se acidificaron con 10 mL de HCl 2M por una hora y posteriormente fueron filtrados y trasvasados a frascos ámbar.

La fase móvil utilizada fue una mezcla de acetato de etilo, ácido fórmico, ácido acético y agua en proporción (10:1.1:1.1:2.6), la misma que se usó para acondicionar la cámara cromatográfica por 30 minutos (Poole, 2015).

Se preparó el estándar de cloruro de cianidina-3-glucósido disolviendo 2 mg de estándar en 1 mL de metanol grado HPLC (Narváez, 2016).

En una placa de vidrio silica gel HPTLC Factor 254 de tamaño 10×10 cm se dibujó una línea a un centímetro del borde de la placa (Corzo, 2019; Pássaro Carvalho y cols., 2016), y con ayuda del aplicador TLC se sembraron 7 μL del estándar de cloruro de cianidina-3-glucósido y 10 μL de los extractos etanólicos del mortiño al 20 y 50%. Se llevó la placa a la cámara cromatográfica saturada previamente para la elución de sus componentes durante una hora y 15 minutos.

Se extrajo la placa de la cámara cromatográfica y con una secadora en frío se secó el disolvente. A continuación, se observaron las manchas generadas en la corrida utilizando un visualizador UV a 254 y 365 nm, luego se calcularon los factores de retención (R_f) del estándar y de los extractos etanólicos de mortiño utilizando la Ecuación 5 (Pássaro Carvalho y cols., 2016).

$$R_f = \frac{\text{dist. recorrida por el compuesto}}{\text{dist. recorrida por el solvente}} \qquad (5)$$

2.6 Análisis estadístico

Dentro del diseño experimental se trabajó con dos concentraciones de extracto etanólico de *Vaccinium floribundum* al 20 y 50%, con tres repeticiones para cada una de las concentraciones de los extractos. Tanto para la determinación de fenoles totales como para la cuantificación de antocianinas, se realizó el procesamiento de datos utilizando el análisis de varianza (ADEVA) con el fin de establecer diferencias significativas con variables paramétricas. Para el análisis funcional con los factores de estudio, se utilizó la prueba de significancia de Tukey al 0.05% y la prueba de "t" para muestras independientes mediante el programa INFOSTAT.

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

3 Resultados y Discusión

3.1 Cuantificación de fenoles totales

La curva de calibración se construyó con siete concentraciones de ácido gálico, cuyo coeficiente de regresión lineal (R^2) fue de 0.9975 (Figura 1).

A partir de la lectura de las absorbancias a 765 nm de cada una de las repeticiones de las muestras de los extractos etanólicos de *Vaccinium floribundum* a las concentraciones de 20 y 50 %, y utilizando la fórmula de la recta, se calcularon las concentraciones de compuestos fenólicos totales, representadas en mg de ácido gálico/100 mL de extracto. Se obtuvo un valor de 537.2624 para el extracto etanólico al 20 % y de 621.0393 para el extracto al 50 %.

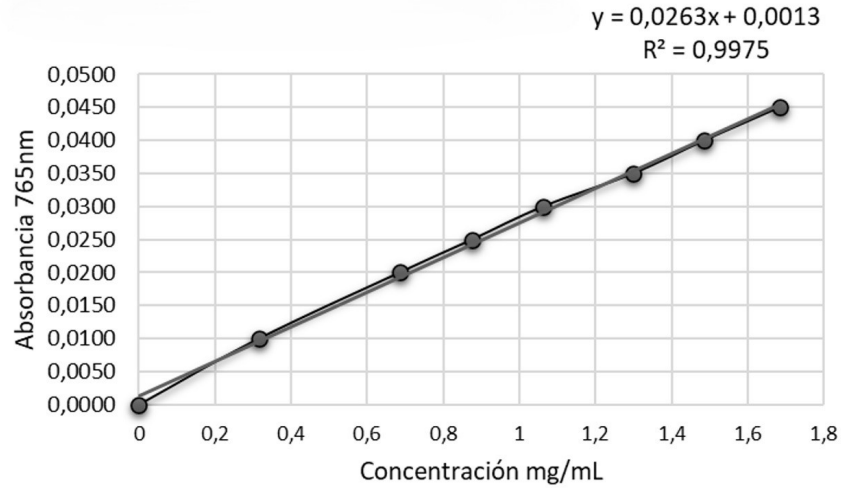


Figura 1. Curva de calibración con ácido gálico mg/mL.

En la Figura 2 se observa la cantidad de fenoles totales en las muestras de *Vaccinium floribundum* al 20 y 50 % de etanol.

Con base en las pruebas estadísticas paramétricas, podemos identificar que hay una diferencia significativa entre el contenido de compuestos fenólicos del extracto etanólico de *Vaccinium floribundum* al 20 % y el extracto etanólico al 50 %. Siendo el valor de $p < 0.0001$, podemos afirmar que el extracto etanólico al 50 % posee un mayor contenido de compuestos fenólicos que el extracto etanólico al 20 %, como se puede evidenciar en el gráfico de barras representado en la Figura 2.

El contenido de compuestos fenólicos tanto del extracto etanólico de *Vaccinium floribundum* al 20 como al 50 % de concentración se puede corroborar con el resultado reportado por Aaby y cols. (2013) en su estudio con el arándano, el cual presenta una concentración de fenoles totales de 564 mg AG/100 g de fruto seco; Grace y cols. (2015) analizaron varias especies del género *Vaccinium*, entre ellas *Vaccinium uliginosum* (arándano negro), en el cual se encontró 504.5 mg AG/100 g de fruto, mientras que Llivisaca y cols. (2018) reportaron un contenido de 146.10 mg AG/100 g de fruto en las muestras recolectadas en la provincia de Pichincha y 107.37 mg AG/100 g de fruto en las muestras provenientes de la provincia de Chimborazo, y mencionan que el contenido de polifenoles totales en las hojas de *Vaccinium floribundum* es significativamente mayor al contenido de polifenoles totales presentes en el fruto (Espinosa y cols., 2016).

3.2 Cuantificación de antocianinas

Aplicando las Ecuaciones 2 y 3, se obtuvieron diferentes concentraciones de antocianinas representadas en mg/L, como se detalla en la Tabla 3.

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

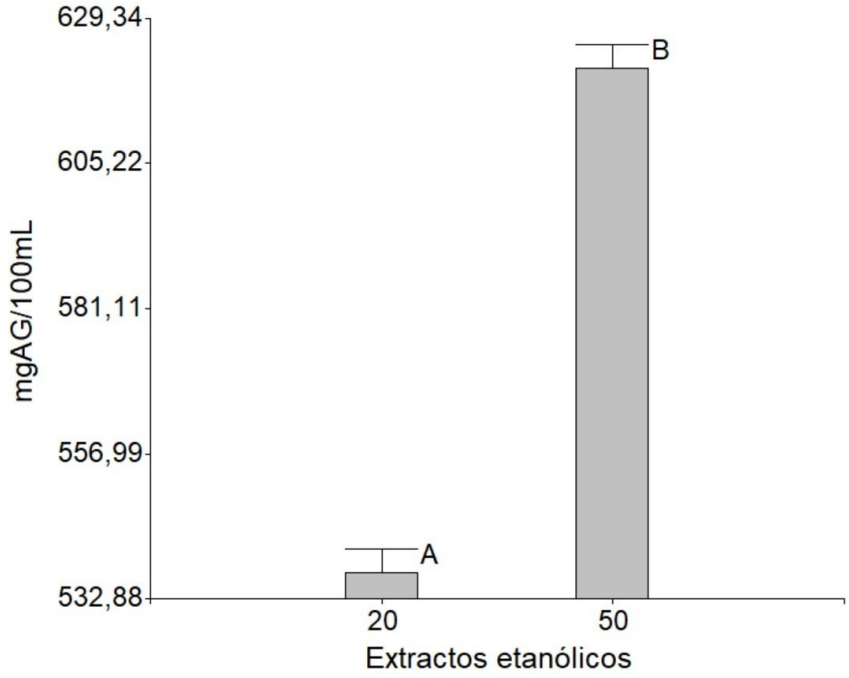


Figura 2. Comparación entre los extractos del 20 y 50% con la cantidad de fenoles totales.

Tabla 3. Cuantificación de antocianinas totales en los extractos de *Vaccinium floribundum* a la concentración de 20 y 50%

Muestras	Lectura Abs por pH diferencial				Concentración de antocianinas		
Ext. etanólico	pH 1		pH 4,5		Abs. prom.	mg/L	mg/mL
E20	0.1447	0.0383	0.1447	0.0393	0.0697	11.6391	0.0116
E50	0.4203	0.0413	0.1630	0.0437	0.2613	43.6342	0.0436

Nota. Las concentraciones corresponden a los resultados obtenidos de la ecuación 3 y se expresan en mg/L. Abs. prom.: promedio de absorbancias.

En la Figura 3 se observa la cantidad de antocianinas totales en las muestras de *Vaccinium floribundum* al 20 y 50% de etanol. De los valores obtenidos mediante el método de pH diferencial, la concentración de antocianinas en el extracto etanólico al 20% fue de 11.6391 mg/L (Tabla 3), similar al valor reportado en *Vaccinium myrtillus* (arándano) (Medina, 2016); mientras que fue el extracto etanólico al 50% el que presentó diferencia significativa ($p < 0.05$) y una concentración de 43.63 mg/L (Figura 3). Este extracto presentó la mayor cantidad de antocianinas obtenidas en el mortiño, a la vez que brindó un buen rendimiento.

Esto pudo haberse dado debido a que los procesos de extracción se relacionan con el estado de madurez de la baya durante la cosecha, y esta puede cambiar de color por la incidencia de la temperatura, el oxígeno y la luz. Las elevadas temperaturas incrementan el desdoblamiento de ácidos, mientras que la acidez está relacionada con el pH que se encuentra en el fruto de mortiño (Guerrero, 2019).

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Por otra parte, respecto a la optimización de procesos extractivos, Pérez y cols. (2020) determinaron que el uso de etanol al 60% a una temperatura de 60 °C resulta eficaz para la cuantificación de antocianinas en *Vaccinium floribundum*, reportando concentraciones de 332.63 mg C3G · 100 g^{-1} FW. En contraste, estudios realizados por Constantine y Istrati (2022) en subproductos de *Vaccinium macrocarpon* sugieren que una mayor concentración de solvente (etanol al 75%) incrementa significativamente la selectividad y la eficiencia en la recuperación de estos compuestos a partir del orujo (Constantine y Istrati, 2022).

Para finalizar, especies como *Ficus carica* L., *Syzygium cumini* L., *Lonicera caerulea* L. y la papa *Purple Majesty*, al ser sometidas al contacto con etanol al 100%, 79.6%, 79.6% y 70% respectivamente, obtuvieron diferentes glucósidos cianidínicos en sus cantidades de antocianinas: 4.32 mg C3R/g de piel de higo DW; 60.5 mg C3GE/g de fruto DW; 22.45 mg C3GE/g de bayas DW y 364.3 mg C3G/kg de papa FW (Tena y Azuero, 2022). Los resultados obtenidos en este estudio son similares a los reportados por otros autores en diferentes especies vegetales.

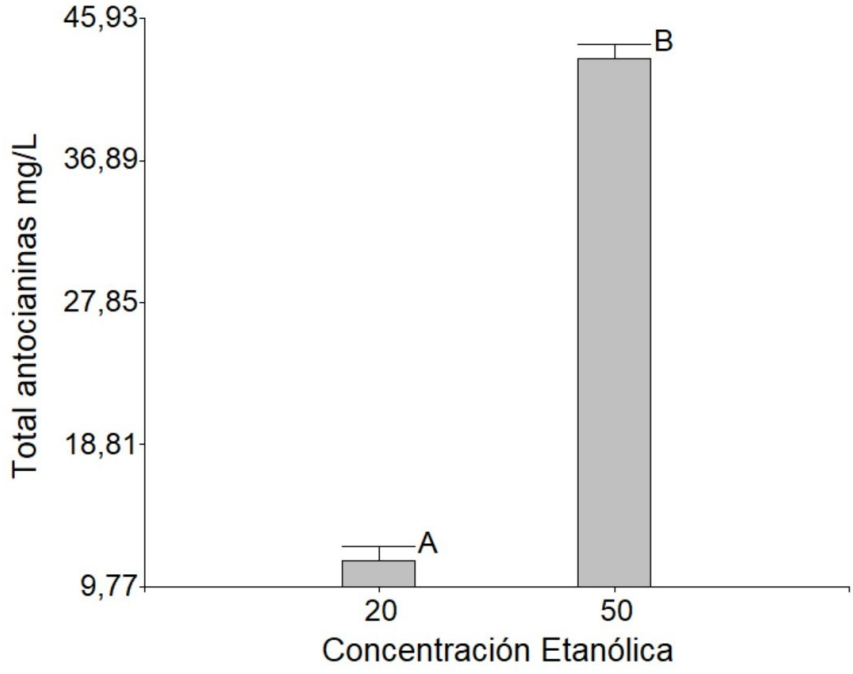


Figura 3. Comparación entre los extractos del 20 y 50% con la cantidad total de antocianinas.

3.3 Determinación de la Concentración Mínima Inhibitoria (MIC)

Como se puede evidenciar en la Tabla 4, que corresponde a la actividad antimicrobiana del extracto etanólico de *Vaccinium floribundum* al 20% frente a la bacteria *Staphylococcus saprophyticus*, el dato obtenido para la concentración mínima inhibitoria es de 390.6 μg/mL y el porcentaje de inhibición fue de 88.42%; mientras que en la Figura 5 se puede observar el comportamiento del extracto etanólico al 20% frente al microorganismo *S. saprophyticus*, afirmando que, a mayor concentración de extracto, mayor es la inhibición del microorganismo (Varela y Musuña, 2020).

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Tabla 4. Actividad antimicrobiana del extracto etanólico de *Vaccinium floribundum* al 20% contra *Staphylococcus saprophyticus*

Concentración extracto (μg/mL)	Abs. del control de crecimiento (C_c)	Promedio Abs. a 450 nm	% inhibición
390.6*	1.229	0.142	88.419**
781.3	1.206	0.135	88.778
1562.5	1.579	0.170	89.234
3125.0	1.462	0.149	89.831
6250.0	1.628	0.164	89.947
12 500.0	1.452	0.138	90.519
25 000.0	1.644	0.143	91.322
50 000.0	1.652	0.143	91.344
100 000.0	1.326	0.112	91.554

Nota. Los asteriscos representan: * concentración mínima inhibitoria; ** porcentaje de inhibición. Abs.: absorbancia.

En la Figura 4 se observa la microplaca teñida de color rojo con colorante TTC al 1%, que indica la presencia de *Staphylococcus saprophyticus*; los pocillos que no presentan coloración son aquellos en los que se está inhibiendo el crecimiento del microorganismo.

Para calcular el porcentaje de inhibición frente a la concentración de cada uno de los extractos etanólicos de *Vaccinium floribundum*, se aplicó la ecuación propuesta por Owen y cols. (2014).

En la Tabla 5 se detalla el valor obtenido para la concentración mínima inhibitoria y el porcentaje de inhibición que el extracto etanólico de *Vaccinium floribundum* al 50% posee sobre *Staphylococcus saprophyticus*, siendo de 390.6 μg/mL y 88.44%, respectivamente.

En la Figura 5 se observa la microplaca teñida de color rojo con colorante TTC al 1%, que indica la presencia de *Staphylococcus saprophyticus*; los pocillos que no presentan coloración son aquellos en los que se está inhibiendo el crecimiento del microorganismo.

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

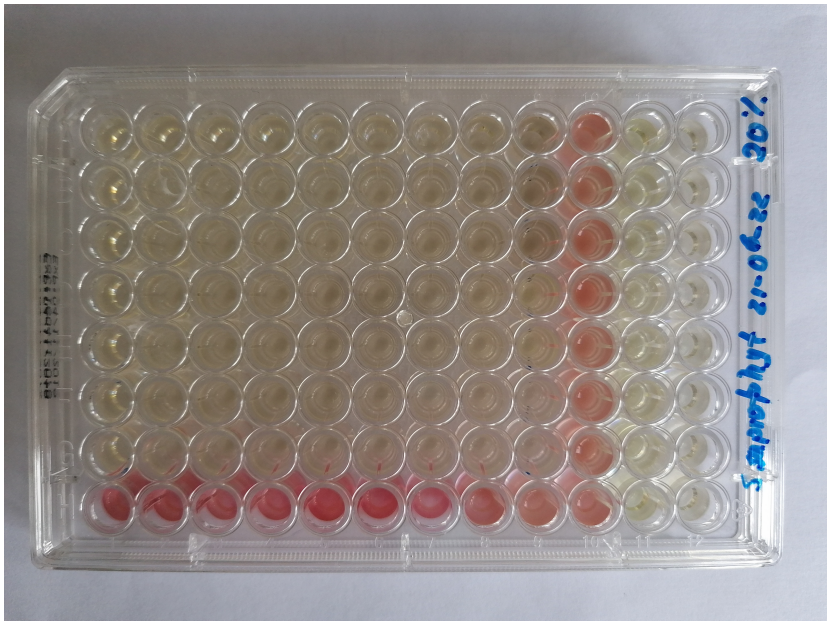


Figura 4. Microplaca de *Staphylococcus saprophyticus* con extracto etanólico al 20% con colorante TTC 1% incubada en un lapso de 24 horas

Tabla 5. Actividad antimicrobiana del extracto etanólico de *Vaccinium floribundum* al 50% contra *Staphylococcus saprophyticus*

Concentración extracto (μg/mL)	Abs. del control de crecimiento (C_c)	Promedio Abs. a 450 nm	% inhibición
390.6*	1.206	0.143	88.439**
781.3	1.229	0.137	88.816
1 562.5	1.579	0.153	88.913
3 125.0	1.462	0.153	88.921
6 250.0	1.628	0.123	88.969
12 500.0	1.452	0.133	89.116
25 000.0	1.644	0.145	89.220
50 000.0	1.652	0.116	89.397
100 000.0	1.326	0.117	89.432

Nota. Los asteriscos representan: * concentración mínima inhibitoria; ** porcentaje de inhibición. Abs.: absorbancia.

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

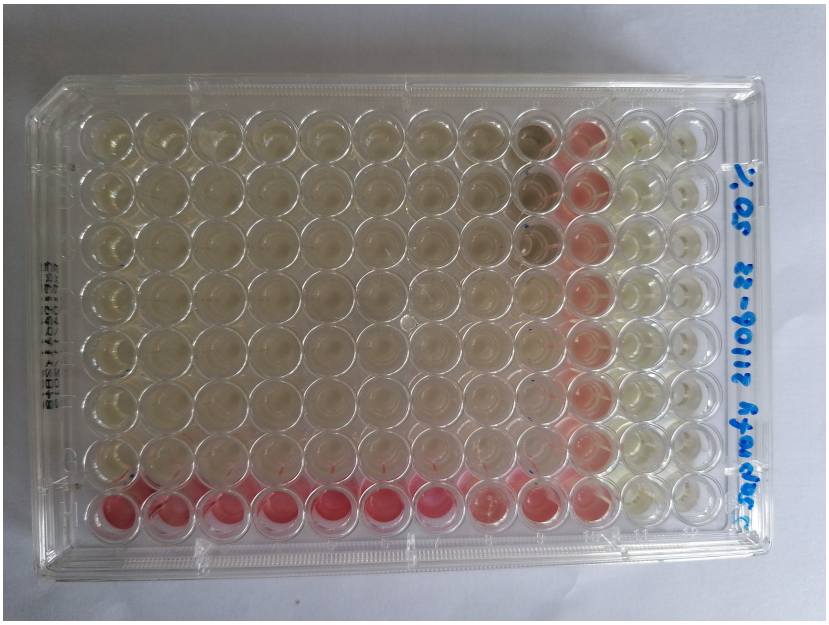


Figura 5. Microplaca de *Staphylococcus saprophyticus* con extracto etanólico al 50 % con colorante TTC al 1 % incubada en un lapso de 24 horas.

En la Tabla 6, comparando los datos obtenidos para la concentración mínima inhibitoria y el porcentaje de inhibición de los extractos etanólicos de *Vaccinium floribundum* al 20 y 50 % frente a *Staphylococcus saprophyticus*, se evidencia que el extracto etanólico de concentración al 50 % presenta mayor porcentaje de inhibición respecto al extracto de concentración al 20 % de etanol. Respecto al control positivo, el antibiótico nitrofurantoína exhibió un porcentaje de inhibición del 87.7 % y una Concentración Mínima Inhibitoria (MIC) de 0.78 μg/mL. Estos valores superaron la eficacia del agente natural evaluado, lo cual se atribuye a la alta susceptibilidad de los uropatógenos frente a este fármaco. El mecanismo de acción implica la reducción de la nitrofurantoína por enzimas nitrorreductasas bacterianas, generando intermediarios electrofílicos altamente reactivos que atacan de forma inespecífica las proteínas ribosomales, lo que deriva en una inhibición metabólica completa (Komp y cols., 2014). Adicionalmente, es necesario mencionar que la MIC alcanzada en los experimentos se acerca a los valores teóricos en estudios con nitrofurantoína que reportan $\leq$ 16 μg/mL dentro del rango de sensibilidad (IDEXX, 2022).

Tabla 6. Porcentaje de inhibición y CMI de los extractos etanólicos de *Vaccinium floribundum* y controles establecidos frente a *Staphylococcus saprophyticus*

Microorganismo	Extracto 20 %		Extracto 50 %		Timol		Nitrofurantoína	
	CMI (μg/mL)	% Inh.	CMI (μg/mL)	% Inh.	CMI (μg/mL)	% Inh.	CMI (μg/mL)	% Inh.
S. saprophyticus	390.63	88.42	390.63	88.44	3.91	87.42	0.78	87.73

Nota. % Inh.: porcentaje de inhibición; CMI: concentración mínima inhibitoria.

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

El mejor resultado frente a *S. saprophyticus* lo obtuvo el extracto etanólico de *Vaccinium floribundum* al 50% con una MIC de 390.63 μg/mL en un porcentaje de inhibición de 88.44%, de acuerdo con lo reportado por Varela y Musuña (2020), quienes trabajaron con granulados de *Vaccinium floribundum* de 150 mg, 200 mg y 250 mg, y en el mismo microorganismo sus porcentajes de inhibición fueron de 50.48%, 91.17% y 86.56% respectivamente, datos que corroboran el porcentaje de inhibición del ensayo.

3.4 Separación de compuestos por Cromatografía de Capa Fina (TLC)

Las placas cromatográficas obtenidas luego de una hora y 15 minutos de corrida fueron las siguientes:

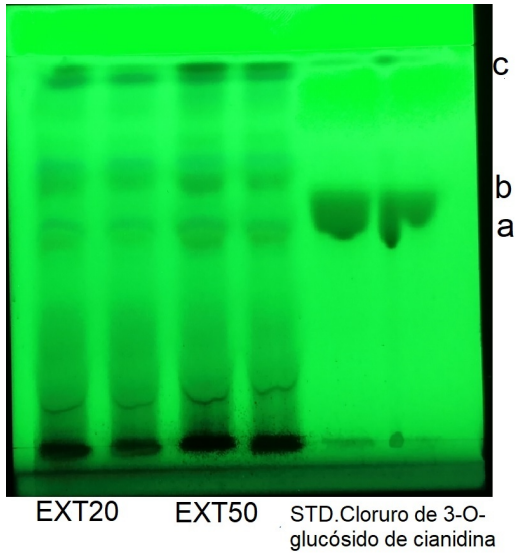


Figura 6. Placa HPTLC factor 254 nm 10×10 cm con componentes separados de los extractos etanólicos al 20% (EXT 20) y 50% (EXT 50) de *Vaccinium floribundum*, respectivamente. Longitud de onda de lectura de placa 254 nm.

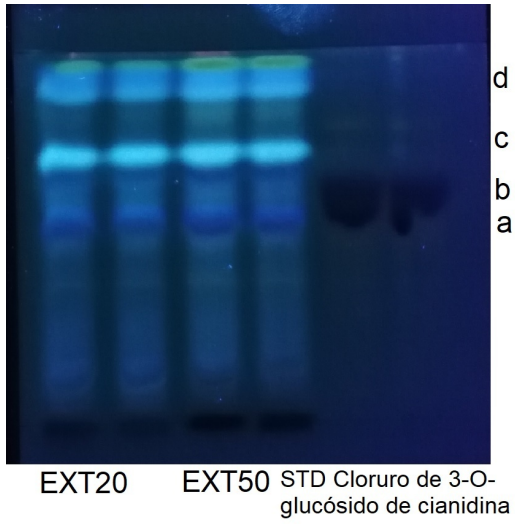


Figura 7. Placa HPTLC factor 254 nm 10×10 cm con componentes separados de los extractos etanólicos al 20% (EXT 20) y 50% (EXT 50) de *Vaccinium floribundum*, respectivamente. Longitud de onda de lectura de placa 365 nm.

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Una vez culminado el proceso, se determinaron los factores de retención relacionando la distancia recorrida por el compuesto y la distancia recorrida por el disolvente (Figura 6). Los resultados se reportan en la Tabla 7.

En relación a los resultados obtenidos, los factores de retención pueden variar por las diferentes longitudes de onda máxima a las cuales se identifican los compuestos. En el caso de las antocianinas y antocianidinas: cianidina 3-galactósido, cianidina 3-arabinósido y malvidina (Tabla 8), estos tienen valores similares a los estudios en el género *Vaccinium* (arándanos) con extractos metanólicos y compuestos hidrolizados descritos por Filip y cols. (2012).

De acuerdo a los resultados de la Tabla 8, los compuestos fueron identificados como cianidina 3-galactósido, cianidina 3-arabinósido, malvidina y cianidina en la especie *Vaccinium floribundum* (mortiño), tal como corrobora Taco (2017).

Mientras que el estándar de cianidina 3-*O*-glucósido disuelto en metanol (2 mg/1 mL) presentó un factor de retención de 0.42, valores similares a lo reportado por Narváez (2016) en la especie *Vaccinium floribundum* (mortiño).

Otros bioactivos interesantes no detectados en la placa HPTLC fueron la delfinidina y la pelargonidina, que se encuentran a longitudes de onda entre 520–546 nm, y de 10 a 15 nm de las longitudes de onda descritas se pueden distinguir sus respectivos monoglucósidos. Los factores adicionales que pueden alterar la identificación de las antocianinas son la naturaleza del solvente y el pH, por lo que la acidificación de los extractos con HCl es importante ya que se dará un cambio sistemático dirigido a obtener longitudes de onda más altas en comparación a extractos acuosos (Filip y cols., 2012). Cabe resaltar que la solubilidad de las antocianinas inmersas en alcohol aumenta cuando se añade ácido clorhídrico, haciéndolas más estables (Eng y cols., 2017).

Tabla 7. Identificación de antocianinas y antocianidinas presentes en los extractos etanólicos al 20 % y 50 % en *Vaccinium floribundum* a longitud máxima de 254 nm, véase Figura 6

Fracción	Compuesto	$\lambda_{máx}$ nm	Rf (factor de retención)
A	Cianidina 3-O-glucósido	254	0.42
B	Malvidina	254	0.62
C	Cianidina	254	0.86

Tabla 8. Identificación de antocianinas y antocianidinas presentes en los extractos etanólicos al 20 % y 50 % en *Vaccinium floribundum* a longitud máxima de 365 nm, véase Figura 7

Fracción	Compuesto	$\lambda_{máx}$ nm	Rf (factor de retención)
A	Cianidina 3-galactósido	365	0.39
B	Cianidina 3-arabinósido	365	0.51
C	Malvidina	365	0.67
D	Cianidina	365	0.86

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

4 Conclusiones

El extracto etanólico de *Vaccinium floribundum* al 50 % presentó mejores resultados al cuantificar compuestos fenólicos y antocianinas totales monoméricas, obteniendo 621.04 mg AG/mL de extracto y 43.63 mg/L, respectivamente.

Fue posible separar e identificar, mediante cromatografía de capa fina (TLC), los compuestos bioactivos antociánicos en el extracto etanólico al 20 % y 50 % en la especie *Vaccinium floribundum*, los cuales fueron: cianidina 3-arabinósido (R_f 0.51), cianidina 3-galactósido (R_f 0.39), malvidina (R_f 0.67) y cianidina (R_f 0.86).

En el presente estudio se validó que los extractos etanólicos de *V. floribundum* al 20 y 50 % presentan actividad antimicrobiana con miras a la inhibición de *Staphylococcus* spp., patógeno promotor de enfermedades de las vías urinarias.

Se recomienda continuar con los estudios utilizando técnicas analíticas efectivas, sensibles y reproducibles como HPLC (Cromatografía Líquida de Alta Eficiencia) con cada componente químico identificado.

Agradecimientos

Agradecemos a la Universidad Politécnica Salesiana, a los Laboratorios de Ciencias de la Vida, al Señor Luis Eduardo Grandes, dueño de la Hacienda San José en Cotopaxi - Cantón Sigchos, y al Grupo de Investigación BIOARN.

Declaración de uso de inteligencia artificial

Los autores DECLARAN que, durante la preparación del artículo titulado «Potencial antimicrobiano del extracto fluido de *(Vaccinium floribundum)* frente a *Staphylococcus saprophyticus* causante de infecciones de vías urinarias», no se utilizaron herramientas de inteligencia artificial generativa ni sistemas automatizados de asistencia para la redacción, análisis, interpretación de datos, generación de contenido, traducción o edición del manuscrito.

Los autores asumen plena responsabilidad por el contenido, la originalidad, la integridad y la versión final del artículo.

Contribución de los autores

J.G.M.M.: Conceptualización, investigación, metodología, supervisión, escritura – borrador original, escritura – revisión y edición. **S.A.M.P.:** Investigación, metodología. **M.E.M.R.:** Adquisición de financiación y recursos. **R.D.A.V.:** Curación y tratamiento de datos.

Referencias

Aaby, K., Grimmer, S., y Holtung, L. (2013). Extraction of phenolic compounds from bilberry (Vaccinium myrtillus L.) press residue: Effects on phenolic composition and cell proliferation. *LWT - Food Science and Technology*, *54*(1), 257–264.

Baenas, N., Ruales, J., Moreno, D. A., Barrio, D. A., Stinco, C. M., Martínez-Cifuentes, G., … García-Ruiz, A. (2020). Characterization of Andean blueberry in bioactive compounds, evaluation of biological properties, and in vitro bioaccessibility. *Foods*, *9*(10), 1483. Online: https://doi.org/10.3390/foods9101483

Condalab. (2019). *Condalab Online.* Online: http://www.condalab.com (Accedido: 23 de agosto de 2022)

Constantine, O., y Istrati, D. (2022). Técnicas de extracción, cuantificación y caracterización de compuestos de antocianina en diversas matrices alimentarias: una revisión. *Review Horticultura*, 1–18. (16 de noviembre)

Cortez, J., Faicán, M., Pirovani, M., y Piagentini, A. (2018). Determinación de polifenoles en frutas con vitamina C incorporada: Metodología para mejorar la especificidad del ensayo de Folin-Ciocalteu. *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha*, *19*(2), 813–818.

Corzo, A. (2019). Cromatografía. En *Técnicas de análisis en química orgánica* (pp. 9–14). Santiago del Estero, Argentina: Universidad Nacional de Santiago del Estero - UNSE. Facultad de Ciencias Forestales.

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

De León, J., Ovadía, R., Vásquez, L., y Fainsod, T. (2009). El arándano y su aplicación en urología. *Revista Mexicana de Urología*, *69*(3), 104–107. (Mayo)

Eng, H., Azlan, A., Teng, S., y Meng, S. (2017). Anthocyanidins and anthocyanins: colored pigments as food, pharmaceutical ingredients, and the potential health benefits. *Food & Nutrition Research*, *61*(1), 1–21.

Espinosa, W., Garzón, L., y Medina, O. (2016). Validación de una metodología analítica para la cuantificación de polifenoles totales, en procesos de extracción asistida por microondas sobre frutos de la especie colombiana Vaccinium meridionale. *Revista Colombiana de Ciencias Químico - Farmacéuticas*, *45*(1), 109–126.

Filip, M., Vlassa, M., Copaciu, F., y Coman, V. (2012). Identification of Anthocyanins and Anthocyanidins from Berry Fruits by Chromatographic and Spectroscopic Techniques to Establish the Juice Authenticity from Market. *Journal of Planar Chromatography*, *25*(6), 534–541.

Giusti, M. M., y Wrolstad, R. (2001). Characterization and Measurement of Anthocyanins by UV-Visible Spectroscopy. En *Current protocols in food analytical chemistry.* Current Protocols.

Grace, M., Esposito, D., Dunlap, K., y Lila, M. A. (2015). Comparative Analysis of Phenolic Content and Profile, Antioxidant Capacity and Anti-inflammatory Bioactivity in Wild Alaskan and Commercial Vaccinium Berries. *HHS Author Manuscripts*, *62*(18), 4007–4017. (7 de mayo)

Guerrero, A. (2019). *Caracterización de compuestos bioactivos: Físicos y químicos del fruto (Vaccinium floribundum Kunth) en la Sierra del Ecuador para uso Agroindustrial* (Tesis Doctoral no publicada). Universidad de las Américas, Quito, Ecuador. (Repositorio Institucional)

Guzmán, D. (2018). *Análisis químico del antibiótico producido por Bacillus megaterium aislado de muestras de suelo, mediante cromatografía y técnicas espectroscópicas* (Tesis Doctoral no publicada). Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador. (Repositorio Institucional)

Hemeg, H. A., Moussa, I. M., Ibrahim, S., Dawoud, T. M., Alhaji, J. H., Mubarak, A. S., … Marouf, S. A. (2020). Antimicrobial effect of different herbal plant extracts against different microbial population. *Saudi Journal of Biological Sciences*, *27*(12), 3221–3227. Online: https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2020.08.015

IDEXX. (2022). *Guía microbiológica.* Online: https://n9.cl/rsq75r

Instituto Nacional de Estadística y Censos. (2019). *Boletín técnico ECEH 2019* (Inf. Téc.). INEC. Online: https://n9.cl/27oan1 (Accedido: 4 de junio de 2022)

Kayima, F. (2012). *Solvent systems for separation of novel anthocyanin aglycones with methylated A - rings from noruega* (Tesis Doctoral no publicada). Noruega.

Komp, P., Klockars, O., Malmberg, C., y Cars, O. (2014). Pharmacodynamic studies of nitrofurantoin against common uropathogens. *Journal of Antimicrobial Chemotherapy*, *15*(12), 1076–1082.

León, J., Aponte, J. J., Rojas, R., Cuadra, D. L., Ayala, N., Tomás, G., y Guerrero, M. (2011). Estudio de actinomicetos marinos aislados de la costa central del Perú y su actividad antibacteriana frente a Staphylococcus aureus meticilina resistentes y Enterococcus faecalis vancomicina resistentes. *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Pública*, *28*(2), 237–246. Online: https://n9.cl/ar6j98

Llerena, W., Samaniego, I., Ramos, M., y Brito, B. (2004). Caracterización fisicoquímica y funcional de seis frutas tropicales y andinas ecuatorianas. *Revista de Alimentos Ciencia e Ingeniería*, *22*(2), 13–22.

Llivisaca, S., Manzano, P., Ruales, J., Flores, J., Mendoza, J., Peralta, E., y Cevallos-Cevallos, J. M. (2018). Chemical, antimicrobial, and molecular characterization of mortiño (Vaccinium floribundum Kunth) fruits and leaves. *Food Science & Nutrition*, *6*(4), 934–942. Online: https://doi.org/10.1002/fsn3.638

Medina, L. (2016). *Laboratorio de farmacognosia y farmacobotanica de la Facultad de Farmacia y Bioquímica* (Tesis Doctoral no publicada). Universidad Nacional de Trujillo, Trujillo, Perú. (Repositorio Institucional)

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Ministerio de Salud Pública. (2013). *Infección de vías urinarias en el embarazo, guía de práctica clínica* (Inf. Téc.). Quito, Ecuador: MSP.

Narváez, G. (2016). *Estabilización de las antiocianinas presentes en el fruto de mortiño (Vaccinium floribundum Kunth) mediante el método de copigmentación intermolecular para la obtención de pigmentos antociánicos de aplicación en la industria farmacéutica y cosmética* (Tesis Doctoral no publicada). Universidad Central del Ecuador, Quito, Ecuador.

Owen, S. C., Doak, A. K., Ganesh, A. N., Nedyalkova, L., McLaughlin, C. K., Shoichet, B. K., y Shoichet, M. S. (2014). Colloidal drug formulations can explain "bell-shaped" concentration–response curves. *ACS Chemical Biology*, *9*(3), 777–784. Online: https://doi.org/10.1021/cb4007584

Palacio Rojas, M., Mejía Fernández, E., Alcivar Banguera, R., Maldonado Reinozo, N., Medina Apolo, M., Bermeo Ortega, J., … ya Muñoz González, J. (2018). Caracterización clínico-demográfica y resistencia bacteriana de las infecciones del tracto urinario en el Hospital Básico de Paute, Azuay - Ecuador. *AVFT – Archivos Venezolanos de Farmacología y Terapéutica*, *37*(2), 62–67. Online: https://n9.cl/cxgx2vy

Poole, C. (2015). *Instrumental thin-layer chromatography* (1ra ed.). Detroit, USA: Elsevier.

Pássaro Carvalho, C. P., Rivera Narváez, C. M., Román Páez, M. A., Cardona Bermúdez, L. M., Muñoz Echeverri, L. M., Gómez, D. D., … Rojas Bedoya, L. C. (2016). *Guía sobre principios básicos de cromatografía y sus aplicaciones*. Servicio Nacional de Aprendizaje SENA. Online: https://hdl.handle.net/11404/4694

Pérez, B., Endara, A., Garrido, J., y Ramírez, L. (2020). Extraction of anthocyanins from Mortiño (Vaccinium floribundum) and determination of their antioxidant capacity. *Revista Facultad Nacional de Agronomía*, *1*(74), 9453–9460.

Rengifo, D. E. (2013). *Prevalencia de las Infecciones Genitourinarias en mujeres de 14 a 49 años de edad, en el Hospital Delfina Torres y Área 1 de la Provincia de Esmeraldas , de enero a agosto de 2013 y evaluación de su manejo clínico terapéutico* (Tesis Doctoral no publicada). Esmeraldas, Ecuador.

Rosales, R. (2018). *Determinación de la capacidad antimicrobiana de extractos de hongos endófitos de la Colección de Endófitos Quito- Católica (CEQCA) sobre cepas multirresistentes de de staphylococcus aureus* (Tesis Doctoral no publicada). Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Quito, Ecuador.

Santacruz, C. (2017). *Uso de pigmentos naturales de mortiño (Vaccinium floribundum) como sensibilizadores en celdas solares DSSC* (Tesis Doctoral no publicada). Universidad Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.

Taco, M. (2017). *Uso de pigmentos naturales de mortiño (Vaccinium floribundum) como sensibilizadores en celdas solares DSSC* (Tesis Doctoral no publicada). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.

Tena, N., y Azuero, A. (2022). Análisis Actualizado de los Métodos de Extracción de Antocianinas: Principios de las Técnicas, Optimización, Avances Técnicos y Aplicación Industrial. *Antioxidants*, *11*(2), 286.

Urbano, C. (2016). *Validación del método analítico para la cuantificación de polifenoles totales en productos elaborados con té verde por método colorimétrico Folin Ciocalteu* (Tesis Doctoral no publicada). Universidad ICESI, Cali, Colombia.

Urquizo, L. (2016). *Influencia de los solventes y los métodos de extracción en la determinación de la actividad antioxidante de la especie "Disterigma alaternoides (Kunth) Nied." planta nativa del Ecuador* (Tesis Doctoral no publicada). Universidad Central del Ecuador, Quito, Ecuador.

Varela, S., y Musuña, A. (2020). *Evaluación de la eficacia antimicrobiana in vitro de cápsulas de extracto fluido de Vaccinium floribundum kunth (mortiño); en infecciones agudas del tracto urinario* (Tesis Doctoral no publicada). Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador.

Veloz, T. (2018). *Evaluación de la composición química y actividad biological del aceite esencial proveniente de las hojas de Piper barbatum Kunth (cordoncillo)* (Tesis Doctoral no publicada). Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador.

Zapata, L. M., Heredia, A. M., Quinteros, C. F., Malleret, A. D., Clemente, G., y Cárcel, J. A. (2014). Optimización de la extracción de antocianinas de arándanos. *Ciencia, Docencia y Tecnología*, *25*(49), 166–192. Online: https://n9.cl/707evp

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

La Granja:
Revista de
Ciencias de la Vida
pISSN:1390-3799; eISSN:1390-8596
https://doi.org/10.17163/lgr.n44.2026.07

Artículo científico / Scientific paper

Ciencias Agrícolas

CC BY NC SA

ABYA YALA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Aplicación de un Modelo de superficie de respuesta en el secado al sol y solar indirecto de uvas variedad moscatel de alejandria (*Vitis vinífera*)

Application of a response surface Model for solar and indirect drying of muscat of alexandria grapes (*Vitis vinífera*)

David Vivanco Pezantes*[1], Haydee Rodriguez Navarro[2], Raúl Siche Jara[3] y David Callirgos Romero[4]

[1]*Universidad Nacional del Callao. Facultad de Ingeniería Pesquera y de Alimentos. Escuela Profesional de Ingeniería de Alimentos. Departamento Académico de Ingeniería de Alimentos.Lima-Perú. [*https://ror.org/01d03q474*]*
[2]*Universidad Nacional de Educación Enrique Guzmán y Valle; Escuela Profesional de Industria Alimentaria y Nutrición. Lima-Perú.[*https://ror.org/0431avj27*]*
[3]*Universidad Nacional de Trujillo (UNT) - Escuela de Ingeniería Agroindustrial, Facultad de Ciencias Agropecuarias. La Libertad, Perú.[*https://ror.org/001b4cb05*]*
[4]*Universidade Federal de Pelotas (UFPel) - Departamento de Ciência e Tecnologia de Alimentos, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel. Pelotas, Brasil.[*https://ror.org/05msy9z54*]*

*Autor para correspondencia: dvivancop@unac.edu.pe

Manuscrito recibido el 19 de octubre de 2023. Aceptado, tras revisión el 30 de octubre de 2024. Publicado el 1 de septiembre de 2026.

Resumen

Al aplicar la metodología de superficie de respuesta, se optimizó el secado al sol y solar indirecto de uvas *Moscatel de Alejandría*. Se midió la humedad inicial y a continuación se pretrataron las uvas mediante tratamiento termoquímico con bajas concentraciones de hidróxido sódico, temperatura y tiempo de inmersión. Las condiciones se establecieron mediante un diseño experimental de compuesto central rotacional, considerando: temperaturas, concentraciones y tiempos entre 55–95 °C, 0.5–3.0 % y 2–30 segundos, respectivamente. Para cada proceso se determinaron los tiempos de secado, considerando el contenido de humedad final del 20 % en base húmeda, así como la aceptación global del producto. Empleando ecuaciones polinómicas de orden cuadrático, se generaron superficies de respuesta para obtener un menor tiempo de secado y un valor máximo de aceptabilidad del producto, obteniéndose altos valores de coeficiente de determinación ($R^2 > 0.97$) e interacciones significantes de las variables independientes ($p < 0.001$). El secado al sol y solar indirecto optimizó el pretratamiento a 80 °C, 1.75 % y 16 s, para la temperatura y concentración de la solución de hidróxido de sodio y tiempo de inmersión, para obtener tiempos de secado de 75 h y 50 h, respectivamente, con un alto grado de aceptabilidad global del producto y una puntuación superior a 8 puntos en la escala hedónica establecida. Se obtuvieron valores de difusividad efectiva del agua de $8.57 \cdot 10^{-11}$ y $1.90 \cdot 10^{-10}$ m^2/s para el proceso de secado al sol y secado solar indirecto, respectivamente. En condiciones óptimas, el modelo matemático de Midilli y cols. (2002) es el que mejor simula la variación de la humedad frente al tiempo de secado de la uva *Moscatel de Alejandría*.

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Palabras clave: Optimización, Secado de uva, Modelación matemática, Difusividad, Metodología de superficie de respuesta.

Abstract

By applying the response surface methodology, we optimized the sun and indirect solar drying of *Muscat of Alexandria* grapes. Initial moisture was measured and then the grapes were pretreated by thermochemical treatment with sodium hydroxide. Employing a centralized planning of rotating compounds, the pretreatment conditions were established, considering: temperatures, concentrations and times between 55–95 °C, 0.5–3.0 % and 2–30 seconds, respectively. For each drying process, drying times were determined, considering the final moisture content of 20 % on a wet basis, as well as the overall acceptance of the product. Using quadratic order polynomial equations, response surfaces were generated to obtain a shorter drying time and a maximum value of product acceptability, obtaining high values of coefficient of determination ($R^2 > 0.97$) and significant interactions of the independent variables ($p < 0.001$). Solar and indirect drying were optimized at 80 °C, 1.75 % and 16 s, for the temperature and concentration of the sodium hydroxide solution and immersion time, to obtain drying times of 75 h and 50 h, respectively, with a high degree of overall product acceptability and a score above 8 points on the established hedonic scale. Effective water diffusivity values of $8.57 \cdot 10^{-11}$ and $1.90 \cdot 10^{-10}$ m^2/s were obtained for the sun-drying and indirect solar drying process, respectively. Under optimal conditions, the mathematical model of Midilli y cols. (2002) best simulates the variation of moisture versus drying time of *Muscat of Alexandria* grapes.

Keywords: Optimization, Grape drying, Mathematical modeling, Diffusivity, Response surface methodology.

Forma sugerida de citar: Vivanco, D., Rodriguez, H., Siche, R. y Callirgos, D. (2026). Aplicación de un Modelo de superficie de respuesta en el secado al sol y solar indirecto de uvas variedad moscatel de alejandria (*Vitis vinífera*). *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida.* Vol. 44(2):116-138. https://doi.org/10.17163/lgr.n44.2026.07.

Orcid IDs:

David Vivanco Pezantes: https://orcid.org/0000-0002-9474-0290
Haydee Rodriguez Navarro: https://orcid.org/0000-0001-7346-4496
Raúl Siche Jara: https://orcid.org/0000-0003-3500-4928
David Callirgos Romero: https://orcid.org/0009-0004-7428-4154

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

1 Introducción

Las uvas en el estado in-natura e inmediatamente después de la cosecha tienen un alto contenido de humedad (Gopinath y cols., 2022), por lo que su actividad acuosa y su contenido de azúcar las hacen muy sensibles al deterioro microbiano durante el almacenamiento e incluso en condiciones de baja temperatura de refrigeración. Por lo tanto, después de la cosecha, deben consumirse o transformarse en diferentes productos mediante procesos como el secado (Adiletta y cols., 2016).

La uva-pasa es un producto comestible de alto valor nutricional y energético; su elaboración en el Perú es artesanal mediante el secado directo al sol. Esta actividad se realiza en lugares donde la incidencia de la radiación solar es alta y generalmente ocurre entre los meses de enero y abril. En Latinoamérica, Argentina es el país que produce pasas de uva a gran escala, y a nivel mundial son China y Estados Unidos (FAO, 2020).

La industria ha generado métodos de secado artificial y actualmente existen una variedad de secadores industriales para la agroindustria. Se cuenta con la energía solar como fuente de energía renovable predominante, en comparación con la energía eólica y la biomasa, debido a su eterna disponibilidad (Gunasekaran y cols., 2021; Kumar y cols., 2021). El secado al sol es una de las formas más antiguas de conservación y quizás el método más barato y común de conservación de productos agrícolas que se practica en la mayoría de los países tropicales. Sin embargo, esta técnica tiene desventajas: depende del clima, requiere mucho tiempo de secado, provoca la formación de polvo, la reproducción de microorganismos, suciedad, insectos, descomposición, alto coste de mano de obra, calidad variable, entre otros (Djebli y cols., 2020; Naigam y cols., 2021).

Por otro lado, el uso de equipos de secado solar indirecto es una buena alternativa desde el punto de vista económico y medioambiental. El secado solar consiste en transformar la energía solar en energía térmica que luego se utiliza para eliminar la humedad del producto (Shalaby y Bek, 2014); por convección natural, el aire fluye dentro del secador (Gopinath y cols., 2022). Por lo tanto, el uso de energía solar y aire caliente en secadores convectivos es una alternativa potencial para su aplicación en países tropicales y subtropicales (Vigneshkumar y cols., 2021) y también por ser más rápido, económicamente viable, higiénico y más eficiente que el secado al sol, proporcionando a los productos secados un mejor color y textura superficial (Castillo-Téllez y cols., 2017; Singh y cols., 2012).

En la actualidad, existen numerosos estudios de investigación de productos agroindustriales que se procesaron utilizando métodos de secado convencionales (sol y aire) y técnicas de secado modernas, como el secado directo al sol, los secadores solares, los secadores convectivos de aire caliente, los secadores convectivos de aire caliente asistidos con diferentes tipos de energía, microondas, infrarrojos, y una combinación de ellos, el uso del proceso de sublimación de hielo o secado por congelación, el calentamiento y secado al aire o al vacío, y otras técnicas de secado híbridas combinadas (Atak y cols., 2022; Javed y cols., 2023), donde se han intentado aplicar pretratamientos en sus diferentes formas antes del secado y observar varios parámetros, entre ellos, principalmente, la calidad y la aceptación global del producto, los tiempos de secado, los efectos sobre las características de rehidratación y la calidad nutricional en el producto final (Pragati y Preeti, 2012).

Sin embargo, existe interés sobre la optimización de los procesos de secado usando metodologías de superficie de respuesta, técnica en la cual se examinan simultáneamente un conjunto de variables mediante un planeamiento experimental, que permite encontrar las interacciones de variables y las condiciones óptimas de un valor máximo o mínimo o un área específica de la superficie generada (Bitaraf y cols., 2012; Chopra y cols., 2011; Myers y cols., 2016; Ramos y cols., 2015).

Revisando la literatura previa, no se encontró ninguna investigación sobre la optimización del proceso de secado en uvas *Moscatel de Alejandría*. Por lo tanto, los objetivos del presente trabajo son estudiar el efecto del pretratamiento de concentración de hidróxido de sodio, la temperatura y el tiempo de inmersión sobre el tiempo de secado al sol directo y el secado solar utilizando un colector de superficie extendida; evaluar la calidad de las uvas pasas en los términos de aceptación global del producto; estimar las constantes de las ecuaciones

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

de la curva de secado y evaluar la difusividad del agua de las condiciones óptimas de secado.

2 Materiales y Métodos

2.1 Materia prima

Las uvas in-natura recién cosechadas provienen del valle de Ica-Perú y fueron adquiridas en el mercado de frutas de la ciudad de Chincha Alta. Las uvas fueron lavadas, luego secadas y medidas con un vernier. Para la caracterización fisicoquímica de la materia prima se realizaron determinaciones preliminares de potencial de hidrógeno (pH), grados brix (°Brix), índice de refracción (–), contenido de agua (%) y actividad de agua (a_w).

2.2 Pretratamiento de la uva

Antes del secado, las muestras seleccionadas fueron sometidas a un tratamiento químico-térmico, considerando temperatura, concentración y tiempo de inmersión; luego fueron lavadas con abundante agua fría a 20 °C y escurridas, eliminando la humedad superficial con toallas de papel.

La Table 1 muestra la codificación de las variables operativas (temperatura, concentración y tiempo de inmersión), investigadas en cinco niveles cada una, y los efectos sobre la variable respuesta, el tiempo de secado y la aceptación global.

Tabla 1. Codificación de las variables de operación para el secado de la uva variedad *Moscatel de Alejandría* (*Vitis vinifera*).

Variables	**Código**	-1.68	-1	0	$+1$	$+1.68$
Temperatura (°C)	x_1	55	63	75	87	95
Concentración (%)	x_2	0.5	1	1.75	2.5	3.0
Tiempo de inmersión (s)	x_3	2	7.7	16	24.3	30

Se utilizó una delineación experimental de compuesto central rotacional (DCCR), que consiste en una planificación factorial completa 2^3, 06 puntos axiales (niveles ± 1.68), y 06 puntos centrales (nivel 0) totalizando 20 ensayos, realizados por duplicado y aleatoriamente, y determinando las condiciones óptimas del proceso. La planificación con los niveles codificados y reales y los resultados se muestran en la Tabla 4.

2.3 Sistema de secado

Se utilizó un secador solar de acero inoxidable (Figura 1) construido especialmente para este proyecto de investigación. El secador es un prototipo a escala comercial. Las dimensiones totales del secador son: $2276 \times 2558 \times 806$ mm (alto $\times$ largo $\times$ ancho), con material de construcción de chapas de acero inoxidable 304 de 1.5 mm de espesor y soportes estructurados de perfiles cuadrados de 2″ (pulgadas). Las dimensiones del colector solar con superficie ampliada fueron: $173 \times 806 \times 2000$ mm, con una cubierta de vidrio transparente de 3 mm de espesor, con un ángulo de inclinación de 15° respecto al plano horizontal y orientado al norte. Las características de una aleta fueron de: $1.5 \times 25 \times 2000$ mm y el número de aletas en la superficie del colector fue de 27. El peso aproximado del equipo era de 350 kg. El equipo de secado se instaló en el patio a cielo abierto de la bodega de vinos Navarro en Chincha Alta, a 13°25.3′ latitud sur y 76°7′57″ longitud oeste. El módulo experimental fue implementado con termómetros para leer las temperaturas a la entrada y salida de aire del colector solar, las temperaturas del aire de secado a lo largo del cuerpo del secador y la velocidad del aire de secado.

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

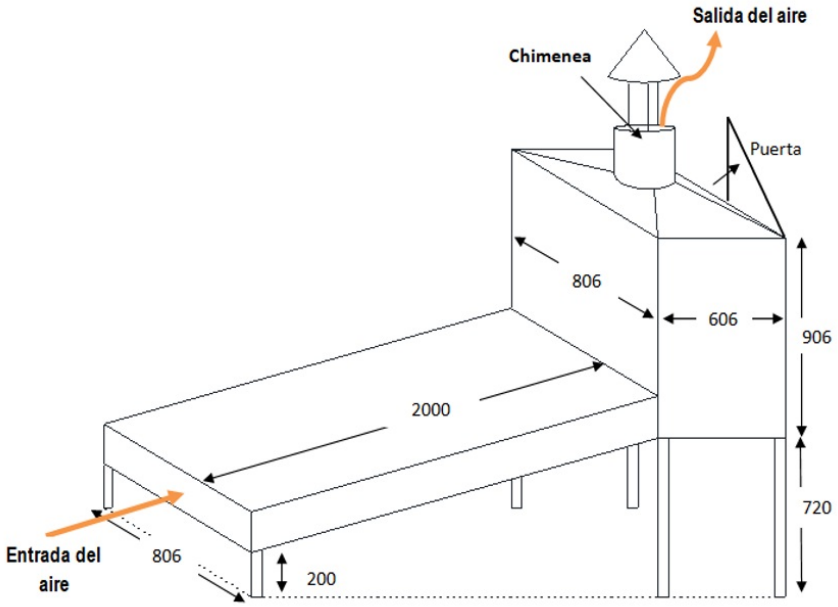


Figura 1. Esquema del secador solar a escala comercial.

Tras los tratamientos químico-térmicos, el proceso de secado de las uvas se llevó a cabo colocando las muestras con un peso medio de 101.27 ± 4.58 g en sus respectivos porta muestras al sol y en el secadero solar indirecto. En este último, el efecto chimenea más el proceso de calentamiento del aire en el colector solar contribuyeron al movimiento del aire de secado y a su desplazamiento a lo largo de la cámara de secado hasta su salida del secadero. Durante el periodo de prueba, la temperatura media del aire ambiente y del aire que entraba en la cámara de secado fue de 27 y 40 °C, respectivamente, con un valor medio de radiación solar de 300 W/m^2.

2.4 Razón de humedad

El módulo adimensional de humedad durante el secado al sol y solar indirecto (Kusuma y cols., 2023), se presenta en la Ecuación 1:

$$MR = \frac{X(t) - X_e}{X_0 - X_e} \tag{1}$$

Donde: MR es la razón de humedad, $X(t)$ es la humedad media en el tiempo t, X_o es la humedad media inicial, y X_e es la humedad media en el equilibrio.

2.5 Difusividad efectiva del agua (D_{eff})

En la forma general de la ecuación de difusión en coordenadas esféricas sin tener en cuenta la generación de masa (Ecuación 2):

$$\frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}\left(r^2\frac{\partial X}{\partial r}\right) + \frac{1}{r^2 sin\theta}\frac{\partial}{\partial \theta}\left(sin\theta\frac{\partial X}{\partial \theta}\right) + \frac{1}{r^2 sin^2\theta}\frac{\partial^2 X}{\partial \phi^2} = \frac{1}{D}\frac{\partial X}{\partial t} \tag{2}$$

Así mismo, considerando que la difusión solo ocurre a través del eje radial, la ecuación simplificada de difusión de masa de agua a través de la sección de la uva en coordenadas esféricas es (Ecuación 3):

$$\frac{\partial X(r,t)}{\partial t} = \frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}\left(r^2 D\frac{\partial X}{\partial r}\right) \tag{3}$$

Para las condiciones iniciales y de frontera en la superficie ($r = R$) y en el centro de la baya de uva ($r = 0$), son (Ecuaciones 4 y 5):

$$X(t = 0.0 \leq r < R) = X_0 \tag{4}$$

$$X(t = 0.0 \leq r < R) = X_0 \tag{5}$$

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Se supone que la distribución inicial de la humedad es uniforme en el núcleo de la esfera, que la humedad superficial es igual al contenido de humedad de equilibrio y que la difusión radial es simétrica.

Considerando que todo el proceso de secado se produce en un período de disminución de la velocidad de secado y que la difusividad del líquido es el factor dominante de todo el proceso, es decir, que el proceso de secado está totalmente controlado por la resistencia interna a la transferencia de masa, se puede utilizar la segunda ley de Fick de la difusión para describir el proceso de secado (Doymaz, 2007; Saravacos y Maroulis, 2001; Srikiatden y Roberts, 2006).

La ecuación 3 puede resolverse analíticamente suponiendo un valor constante del radio (no se considera la contracción) y el valor del coeficiente de difusividad durante el proceso de secado, lo que genera la ley de Fick para la difusión en geometrías esféricas (Ecuación 6):

$$MR = \frac{X(t) - X_e}{X_o - X_e} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left[\frac{-n^2\pi^2 \cdot D \cdot t}{R^2}\right] \quad (6)$$

Y para periodos de tiempos largos de secado, la Ecuación 6 puede ser simplificada y expresada (Crank, 1975; Doymaz, 2004; Di Matteo y cols., 2000; Rizvi, 1986) como se presenta en la Ecuación 7:

$$MR = \frac{X(t) - X_e}{X_o - X_e} = \frac{6}{\pi^2} \exp\left(\frac{-\pi^2 \cdot D_{\text{eff}} \cdot t}{R^2}\right) \quad (7)$$

Tomando logaritmos a ambos miembros (Ecuación 8):

$$Ln(MR) = Ln\left(\frac{6}{\pi^2}\right) - \left(\frac{\pi^2 D_{eff}\, t}{R^2}\right) \quad (8)$$

Donde R (m) es el radio medio de la uva y D_{eff} es la difusividad efectiva de humedad (m^2/s) que es determinada desde la pendiente de la gráfica de Ln(MR) versus el tiempo de secado (t).

2.6 Metodología de superficie de respuesta

Esta metodología comprende un conjunto de técnicas matemáticas que se utilizaron para optimizar el proceso de secado, donde las variables de respuesta fueron el tiempo de secado y la aceptación global del producto, que se vieron influenciadas por los factores cuantitativos: temperatura (°C): x_1, concentración (%): x_2 y tiempo de inmersión (s): x_3.

De acuerdo con el diseño experimental propuesto, la técnica de metodología de superficie de respuesta aproxima una relación matemática polinómica de segundo orden, como se muestra en la Ecuación 9.

$$y = \beta_o + \sum_{i=1}^{k} \beta_i x_i + \sum_{i=1}^{k} \beta_{ii} x_i^2 \sum_{i<1} \sum \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (9)$$

2.7 Simulación matemática de la curva de secado

Se utilizaron 6 modelos matemáticos (Tabla 2) con los cuales se simuló la curva de secado de las condiciones óptimas, tales como: Henderson-Pabis, Henderson-Pabis modificada, Page, Page modificada, Newton y Midilli y cols. (2002) (Bombana y cols., 2023; Kusuma y cols., 2023; Subbian y cols., 2021).

Tabla 2. Modelos matemáticos para la simulación de la curva de secado.

Modelo	**Ecuación**	
Henderson-Pabis	$MR = a \cdot \exp(-k.t)$	(10)
Henderson-Pabis Modificado	$MR = a \cdot \exp(-k.t) + b \cdot \exp(-g.t) + c \cdot \exp(-h.t)$	(11)
Page	$MR = \exp(-k.t^n)$	(12)
Page Modificado	$MR = [\exp(-k.t)]^n$	(13)
Newton	$MR = a \exp(-k.t)$	(14)
Midilli *et al.*	$MR = a \cdot \exp(-k.t^n) + b.t$	(15)

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

2.8 Análisis estadístico

Se utilizó el programa Statistica v. 7.0 para analizar los efectos de las variables independientes sobre el tiempo de secado y la aceptación global del producto. También se determinó el coeficiente de determinación R^2, que indicó el grado de ajuste del polinomio cuadrático de la superficie de respuesta. El ajuste de las constantes de los modelos matemáticos no lineales propuestos para simular la curva de secado se determinó mediante el paquete informático SOLVER (Microsoft Corporation MS-Excel®), que emplea el método de resolución de gradiente reducido generalizado con un grado de convergencia de 10^{-5}.

Para los modelos propuestos se evaluó la calidad de ajuste de la ecuación a los datos experimentales, calculando el coeficiente de determinación (R^2), la suma de los errores cuadrados (*SSE*), la raíz media de los errores cuadrados (*RMSE*), el error porcentual medio relativo (*EMR*) y el chi-cuadrado reducido (χ^2), los cuales se calculan mediante las Ecuaciones 16, 17, 18, 19 y 20, respectivamente:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N}(MR_{\exp_i} - MR_{\mathrm{mod}_i})^2}{\sum_{i=1}^{N}\left(\overline{MR}_{\exp_i} - MR_{\mathrm{mod}_i}\right)^2} \quad (16)$$

$$SSE = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(MR_{\exp_i} - MR_{\mathrm{mod}_i})^2 \quad (17)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(MR_{\exp_i} - MR_{\mathrm{mod}_i})^2\right]^{1/2} \quad (18)$$

$$EMR(\%) = \frac{100}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{\left|MR_{\exp_i} - MR_{\mathrm{mod}_i}\right|}{MR_{\exp_i}} \quad (19)$$

$$\chi^2 = \frac{1}{N-n}\sum_{i=1}^{N}(MR_{\exp_i} - MR_{\mathrm{mod}_i})^2 \quad (20)$$

3 Resultados y Discusión

3.1 Caracterización Fisicoquímica

Los resultados de las propiedades fisicoquímicas de la uva se muestran en la Tabla 3, y se presentan los valores medios y la desviación estándar correspondiente. El valor del potencial hidrógeno (pH) varía entre 4.00 y 3.26, que lo define como un producto agridulce. En tanto, el contenido de agua varía entre 79.24 y 80.76 %, encontrándose dentro del rango común presentado en todas las variedades de uvas, que va desde 70 al 80 % (Srivastava y cols., 2021) y el valor de la actividad de agua fluctuó entre 0.9627 a 0.9671. En tanto, la concentración de sólidos diluidos en calidad de sacarosa que se encontró en la baya varió de 17.21 a 23.35 °Brix, valor característico de este tipo de producto de uva-pasa en su estado maduro. En variedades de uvas moscatel de Alejandría se reportan valores similares de 22.4; 22; 21.4 °Brix y de 3.63; 3.20; 3.44 para pH, en frutos considerados maduros y aptos para obtener pasas o vinos (Corona y cols., 2020; Harutyunyan y cols., 2022; Pedrosa-López y cols., 2022).

Tabla 3. Variables fisicoquímicas de la uva variedad moscatel de Alejandría (*Vitis vinifera*)

Variable fisicoquímica	Valor medio ± desviación estándar
Potencial de hidrógeno (pH)	3.63 ± 0.37
Grados Brix (°Bx)	20.28 ± 0.36
Índice de refracción (–)	1.364 ± 0.005
Contenido de agua (%)	80.00 ± 0.76
Actividad de agua (a_w)	0.9649 ± 0.0022

3.2 Influencia de las variables independientes en el tiempo de secado al sol y solar indirecto

La Figura 2 (a y b) muestra el diagrama de Pareto para el análisis del efecto de las variables independientes: T (°C), C (%) y t (s), combinadas sobre la variable respuesta del tiempo de secado, utilizando el secado al sol y el secador solar indirecto para la obtención de uva-pasa Moscatel de Alejandría (Tabla 4). Se observa la fuerte influen-

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

cia de la temperatura de la solución (°C), el tiempo de inmersión (s) y la concentración (%). La interacción lineal de la concentración con el tiempo de inmersión no es influyente en ambos procesos; la concentración no es influyente para el secado al sol. No obstante, en el secado solar indirecto, las interacciones entre temperatura-concentración y temperatura-tiempo de inmersión se incluyeron en el modelo de regresión. Aunque no mostraron una influencia significativa sobre la variable respuesta, su integración permite mantener una mayor precisión en la modelización de la superficie.

3.3 Influencia de las variables independientes en la aceptación global de la uva-pasa: secado al sol y solar indirecto

La Tabla 4 presenta los valores de aceptación global. Por otro lado, los efectos estimados de las variables independientes sobre la aceptación global de la uva de la variedad Moscatel de Alejandría se presentan en las Figuras 2 (a, b) y 3 (a, b).

Se observa que las tres variables: temperatura, concentración y tiempo de inmersión en sus formas lineales y cuadráticas tienen efectos en las variables dependientes del tiempo de secado y aceptación global, a excepción de la concentración en su función cuadrática (Q) en el secado al sol; asimismo, la interacción lineal de la temperatura y concentración (1L × 2L) y temperatura y tiempo de inmersión (1L × 3L), en la evaluación de tiempo de secado y la aceptación global se considera menos importante en el secado indirecto solar. Sin embargo, para que el modelo matemático no perdiera precisión en el coeficiente de determinación (R^2), se tuvieron en cuenta todas las interacciones para la obtención de los coeficientes de regresión de la superficie de respuesta.

Tabla 4. Diseño compuesto central rotacional con los valores codificados y reales y las variables de respuesta.

Tratamiento	Variables codificadas			Variables reales			Secado al sol		Secado solar indirecto	
	x_1	x_2	x_3	T (°C)	C (%)	t (s)	Tiempo de secado (h)	Aceptación global	Tiempo de secado (h)	Aceptación global
1	-1	-1	-1	63	1	7.7	112	6	110	3
2	1	-1	-1	87	1	7.7	90	7	64	6
3	-1	1	-1	63	2.5	7.7	122,5	6.5	72	8
4	1	1	-1	87	2.5	7.7	63	7	60	9
5	-1	-1	1	63	1	24.3	66.5	7	64	3
6	1	-1	1	87	1	24.3	72	8	51	6
7	-1	1	1	63	2.5	24.3	149	6	92	5
8	1	1	1	87	2.5	24.3	82.5	7	60	8
9	-1.68	0	0	55	1.75	16	142.5	6	112	6
10	1.68	0	0	95	1.75	16	79.5	7	45	7
11	0	-1.68	0	75	0.5	16	84.5	8	80	4
12	0	1.68	0	75	3	16	81.5	6	75	7
13	0	0	-1.68	75	1.75	2	171	6.5	107	4
14	0	0	1.68	75	1.75	30	82.5	9	60	8
15	0	0	0	75	1.75	16	77.5	8.5	68	9
16	0	0	0	75	1.75	16	73	8	65	8
17	0	0	0	75	1.75	16	75	8.5	58	9
18	0	0	0	75	1.75	16	79.5	8	64	9
19	0	0	0	75	1.75	16	74	8.5	68	8
20	0	0	0	75	1.75	16	76	8	63	8

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

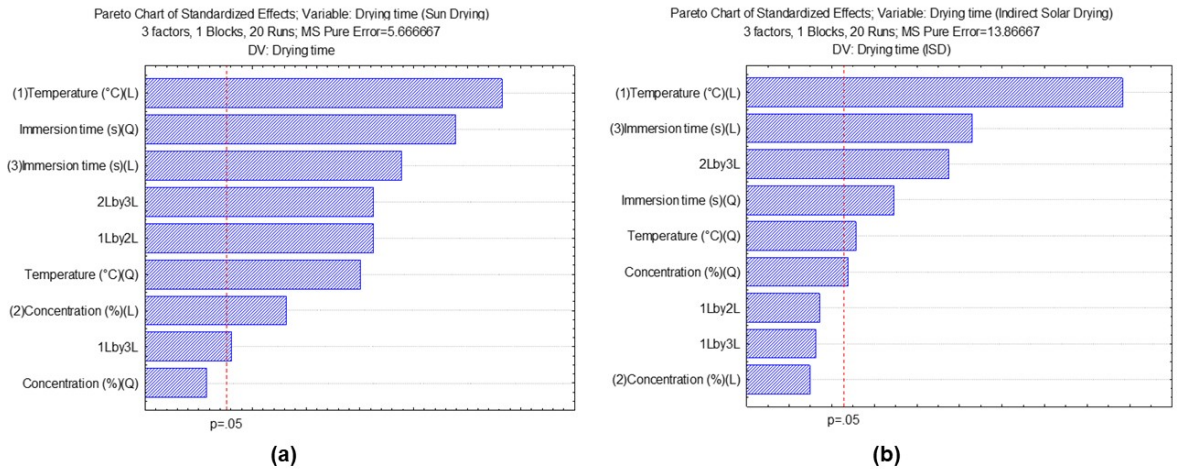


Figura 2. Efecto de las variables independientes sobre el tiempo de secado de la uva variedad Moscatel de Alejandría (a) secado al sol (b) secado solar indirecto.

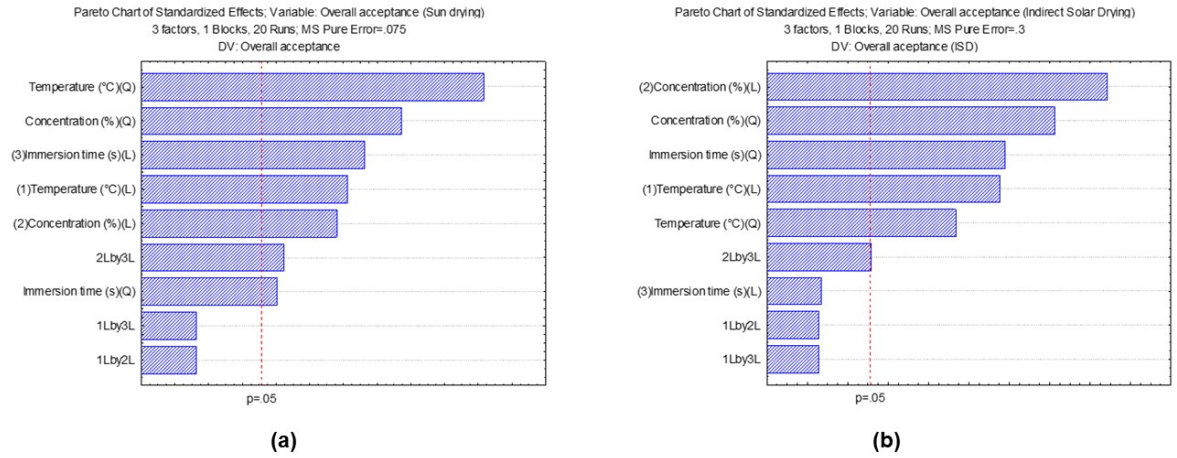


Figura 3. Efecto de las variables independientes sobre la aceptación global de la uva-pasa variedad Moscatel de Alejandría (a) secado al sol (b) secado solar indirecto.

3.4 Análisis de varianza en la estimación del tiempo de secado y aceptación global del producto en el secado al sol y solar indirecto

Al analizar la significancia de las constantes en las ecuaciones de regresión (Tabla 5), se observó que el valor F calculado (F_c) superó al valor crítico de la tabla $F_{0.95;9;10} = 3.02$ para un nivel de confianza del 95%. Dado que en todos los casos $F_c > F_t$, tanto para la predicción del tiempo de secado como para la aceptación global de la uva-pasa, se concluye que los modelos de regresión son estadísticamente significativos. Las constantes de regresión para estimar el tiempo de secado y la aceptación global de la uva-pasa se presentan en las Tablas 6 y 7, respectivamente, tanto para el secado al sol como para el indirecto.

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Tabla 5. Análisis de varianza principal para el tiempo de secado y aceptación global de la uva variedad Moscatel de Alejandría en el secado al sol y secado solar indirecto.

		Tiempo de secado					Aceptación global				
Proceso		SS	GL	MQ	F_c	F_t	SS	GL	MQ	F_c	F_t
Secado al sol	Regresión	14 250.11	9	1 583.34	5.10	3.02	15.99	9	1.776	8.27	3.20
	Error residual	3 105.59	10	310.56			2.15	10	0.215		
	Falta de ajuste	3 077.26	5	615.45	108.62		1.77	5	0.335	4.73	
	Error puro	28.33	5	5.67			0.38	5	0.075		
Secado solar indirecto	Regresión	5 755.14	9	639.46	5.62	3.02	62.06	9	6.896	4.40	3.02
	Error residual	1 138.66	10	113.87			15.69	10	1.569		
	Falta de ajuste	1 069.32	5	213.87	15.42		14.19	5	2.838	9.46	
	Error puro	69.33	5	13.87			1.50	5	0.30		

Nota: SS: suma cuadrática; GL: grados de libertad; MQ: media cuadrática; F_c y F_t: valor F calculado y de tabla respectivamente.

Tabla 6. Efectos estimados y coeficientes de regresión de las variables independientes sobre la variable de respuesta del tiempo de secado al sol y aceptación global de la uva-pasa de la variedad Moscatel de Alejandría.

	Tiempo de secado (h) ($R^2 = 0.82062$)				**Aceptación global** ($R^2 = 0.88033$)			
Parámetro codificado	Efecto estimado	Valor P	Coeficiente de regresión	Valor P	Efecto estimado	Valor P	Coeficiente de regresión	Valor P
k_0	76.3072	0.000000	76.3072	0.000000	8.256595	0.000000	8.256595	0.000000
x_1	-36.4007	0.000001	-18.2003	0.000001	0.75926	0.003705	0.379632	0.003705
x_2	18.9122	0.000023	9.4561	0.000023	-1.32369	0.000260	-0.661845	0.000260
x_3	10.4743	0.000458	5.2372	0.000458	-0.71236	0.004866	-0.356180	0.004866
x_1^2	-0.9291	0.492746	-0.4646	0.492746	-0.96938	0.001115	-0.484690	0.001115
x_2^2	-24.3580	0.000008	-12.1790	0.000008	0.83548	0.002441	0.417742	0.002441
x_3^2	30.0729	0.000002	15.0346	0.000002	-0.43729	0.029070	-0.218959	0.029070
$x_1 \cdot x_2$	-27.3750	0.000016	-13.6875	0.000016	-0.12500	0.547054	-0.0625000	0.547054
$x_1 \cdot x_3$	5.1250	0.028597	2.5625	0.028597	0.12500	0.547054	0.0625000	0.547054
$x_2 \cdot x_3$	27.3750	0.000016	13.6875	0.000016	-0.62500	0.023271	-0.3125000	0.023271

Nota: $x_1 = \frac{T-75}{12}$; $x_2 = \frac{C-1.75}{0.75}$ y $x_3 = \frac{t-16}{8.30}$, donde: T: temperatura, C: concentración y t: tiempo de inmersión.

3.5 Superficie de respuesta en la estimación del tiempo de secado y aceptación global del producto en el secado al sol

En el proceso de secado, la capa cerosa de la piel de la uva dificulta la eliminación del agua *in situ* y alarga el tiempo de secado. Por este motivo, se han propuesto pretratamientos químicos que provocan la disolución de esta capa, junto con la formación de microfisuras en su superficie, controlando así la tasa de pérdida de agua y reduciendo el tiempo necesario para obtener el nivel correcto de deshidratación (Corona y cols., 2020; Patidar y cols., 2021).

En la Figura 4 se presenta la superficie de respuesta del tiempo de secado (h) (a) y de contorno (b) versus la temperatura (°C) y el tiempo de inmersión. Para tiempos de inmersión en el rango de 16 a 20 segundos, temperaturas de la solución en el rango de 80 a 90 °C y concentraciones de la solución de 1 a 1.5%, se alcanzan tiempos de secado menores a

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

80 h, que equivalen a menos de 11 días de secado directamente al sol; esto reduce el tiempo de proceso en comparación con lo realizado por Corona y cols. (2020), quienes aplicaron un pretratamiento químico a las bayas de uva Moscatel de Alejandría, sumergiéndolas en una solución de hidróxido de sodio (45 g/L) por 185 s y a una temperatura de 25 °C, alcanzando un tiempo de secado de 13 días bajo estas condiciones. Esto se debe al fenómeno de la deshidratación, que se explica por la transferencia de masa, influida por el contenido de agua y azúcar, así como por la homogeneidad de las bayas que se van a secar en términos de tamaño, peso y densidad.

La velocidad de secado de las uvas-pasa es directamente proporcional a la temperatura de deshidratación: a mayor temperatura, aumenta la tasa de transferencia de la masa y se reduce el tiempo de proceso. Por ejemplo, en el cultivar 'Zicui', la deshidratación más eficiente ocurrió a 50 °C; en contraste, el tiempo necesario para completar el proceso se extendió a 11 días a 40 °C y hasta 20 días cuando se trabajó a 30 °C (Chen y cols., 2022).

La Figura 5 muestra la superficie de respuesta (a) y el contorno (b) de la aceptación global frente a la temperatura (°C) y la concentración de la solución (%), manteniendo constante el valor de 16 segundos del tiempo de inmersión.

Tabla 7. Efectos estimados y coeficientes de regresión de las variables independientes sobre la variable de respuesta del tiempo de secado solar indirecto y aceptación global de la uva-pasa variedad Moscatel de Alejandría.

	Tiempo de secado (h) ($R^2 = 0.82062$)				**Aceptación global** ($R^2 = 0.88033$)			
Parámetro codificado	Efecto estimado	Valor P	Coeficiente de regresión	Valor P	Efecto estimado	Valor P	Coeficiente de regresión	Valor P
k_0	64.6401	0.000000	64.6401	0.000000	8.49475	0.000000	8.49475	0.000000
x_1	-31.5959	0.000019	-15.7980	0.000019	1.71201	0.002192	0.85600	0.002192
x_2	6.1494	0.025972	3.0747	0.025972	-1.35061	0.005468	-0.67530	0.005468
x_3	-1.9641	0.374713	-0.9821	0.374713	2.49765	0.000387	1.24883	0.000387
x_1^2	5.4407	0.039418	2.7204	0.039418	-2.05923	0.000845	-1.02961	0.000845
x_2^2	-17.2901	0.000355	-8.6451	0.000355	0.39869	0.236591	0.19934	0.236591
x_3^2	9.6924	0.004350	4.8462	0.004350	-1.70492	0.001992	-0.85246	0.001992
$x_1 \cdot x_2$	3.7500	0.213701	1.8750	0.213701	-0.50000	0.253170	-0.25000	0.253170
$x_1 \cdot x_3$	3.2500	0.271944	1.6250	0.271944	0.50000	0.253170	0.25000	0.253170
$x_2 \cdot x_3$	19.7500	0.000666	9.8750	0.000666	-1.00000	0.049313	-0.50000	0.049313

Nota: $x_1 = \frac{T-75}{12}$; $x_2 = \frac{C-1.75}{0.75}$ y $x_3 = \frac{t-16}{8.30}$, donde: T: temperatura, C: concentración y t: tiempo de inmersión.

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

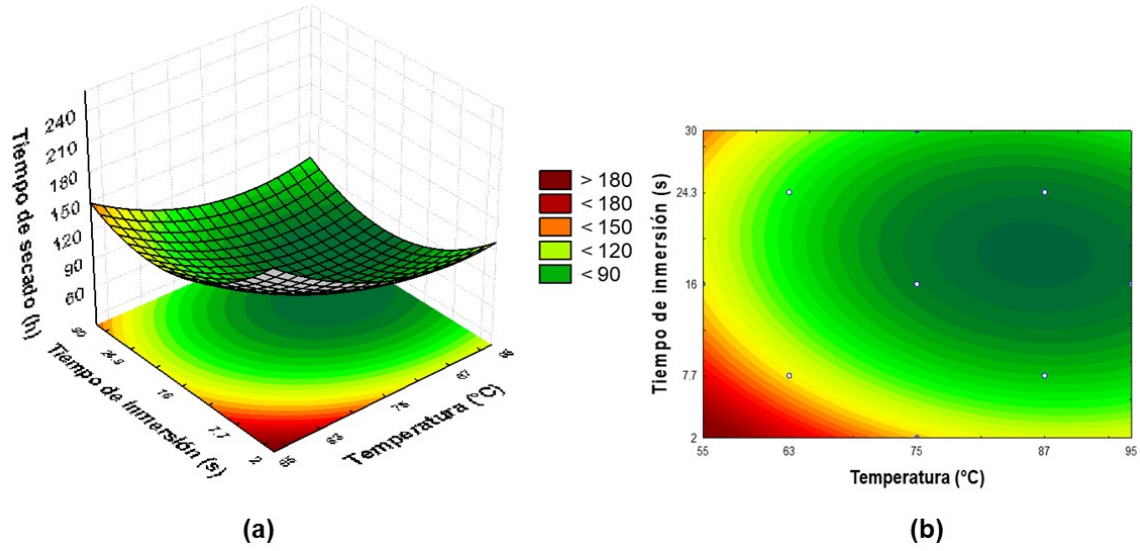


Figura 4. Superficie de respuesta del tiempo de secado (h) (a) y de contorno (b) de la uva variedad Moscatel de Alejandría versus temperatura (°C) y tiempo de inmersión (s).

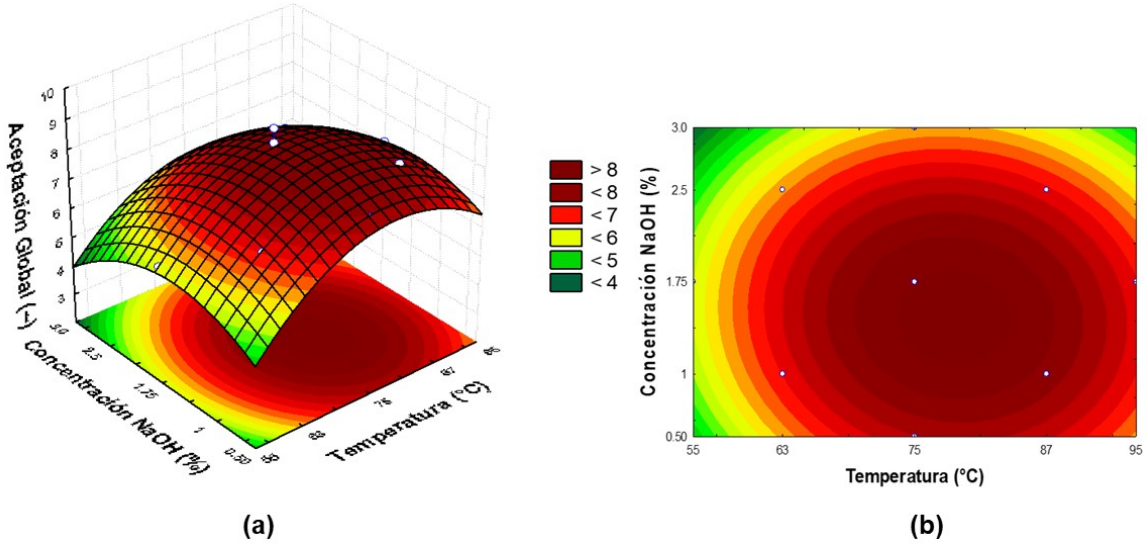


Figura 5. Superficie de respuesta (a) y de contorno (b) de la aceptación global de uva-pasa variedad Moscatel de Alejandría versus temperatura (°C) y concentración de la solución (%).

A medida que aumentan los valores de las variables independientes, generan una curva con un punto de inflexión máximo para la aceptación global (> 8) de la pasa a una humedad del 20% en base húmeda. Se observa que los valores más altos de la aceptación global se encuentran en el rango de temperatura de 80–85 °C de la solución de NaOH en concentraciones entre 1 y 1.5%. Se recomienda utilizar valores bajos de concentración de la solución, para que pueda ser fácilmente eliminada con abundante agua fría después del tratamiento químico-térmico. Según Patidar y cols. (2021), a lo largo de la deshidratación se producen muchos cambios deseables en las propiedades físicas, químicas y bioquímicas debido a las condiciones de pretratamiento y secado. Así, los carbohidratos y compuestos orgánicos de las uvas frescas se retienen en forma concentrada en las pasas, mejorando

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

su aceptabilidad para los consumidores. Por otra parte, el NaOH no solo mejora las características de secado, sino que también mejora los atributos de color de las pasas (Vázquez y cols., 2000).

Además de producir pasas de buena calidad, desafortunadamente existen algunas preocupaciones ambientales y de salud relacionadas con el uso de productos químicos para el pretratamiento de las uvas. En el tema ambiental se generan aguas residuales que contienen sólidos orgánicos, salinos y altamente corrosivos, y en el caso alimentario, estos químicos quedan en el producto seco, lo que puede causar problemas de seguridad alimentaria (Adiletta y cols., 2016; Deng y cols., 2019; Wang y cols., 2017).

La baja concentración de NaOH (1–1.5%) utilizada en esta investigación permite acelerar el proceso de secado y, al mismo tiempo, reduce la probabilidad de producir pasas con un impacto medioambiental negativo y alimentos inseguros, ya que estos dos factores se intensifican a mayores concentraciones de NaOH.

Sobre lo analizado, se presentan en la Tabla 8 las variables independientes o parámetros de procesamiento del secado directo al sol para minimizar y maximizar el tiempo de secado y la aceptación global del producto, respectivamente.

Tabla 8. Parámetros de procesamiento de secado directamente al sol de la uva variedad Moscatel de Alejandría.

Variable independiente	Parámetros de proceso	Tiempo de secado (h)	Aceptación global (–)
Temperatura (°C)	80–85	Aproximadamente ≤ 80 h	Aproximadamente > 8
Concentración (%)	1–1.5		
Tiempo de inmersión (s)	16–20		

3.6 Superficie de respuesta en la estimación del tiempo de secado y aceptación global del producto en el secado solar indirecto

La Figura 6 muestra la superficie de respuesta (a) y de contorno (b) del tiempo de secado de la uva Moscatel de Alejandría frente a la temperatura (°C) y el tiempo de inmersión (s). Se afirma que, para tiempos de inmersión de 16 a 20 segundos, una temperatura de la solución de 80 a 90 °C, y una concentración de la solución de 1 a 2%, utilizando el secador solar indirecto, se consiguen tiempos de secado inferiores a 60 h, equivalentes a menos de 6 a 7 días de secado.

El menor tiempo de secado se obtuvo con el secado solar indirecto en comparación con el secado al sol; esto se debe a que el primero dispone de un colector solar formado por una superficie de vidrio transparente y un absorbedor negro, donde se recoge la energía solar que calienta el aire fresco que entra en la cámara de secado, donde las uvas se calientan por absorción indirecta de calor. Además, debido a la diferencia de presión generada por la chimenea, se consigue una circulación natural del aire, lo que acelera el proceso de evaporación de la humedad presente en las uvas (EL-Mesery y cols., 2022).

Otro factor para considerar es que el secado solar indirecto fue realizado con una radiación solar media de 300 W/m^2. Leon Dharmadurai y cols. (2022), usando reflectores, alcanzaron una radiación solar máxima de 1079.8 W/m^2 y un tiempo de secado de 5 días para uvas verdes sin semilla y concluyeron que la reducción del tiempo de secado está influenciada positivamente por el método de secado solar indirecto y la convección natural del aire caliente dentro de la cámara de secado.

En la Figura 7 se presenta la superficie de respuesta (a) y de contorno (b) del grado de aceptación global de uva-pasa variedad Moscatel de Alejandría versus temperatura (°C) y tiempo de inmersión (s).

Se logra obtener valores de aceptabilidad global del producto mayores a 8, siempre que se mantenga la concentración de solución al 1% y se trabaje con temperaturas entre 75–90 °C y tiempos de inmersión de 16–25 segundos.

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

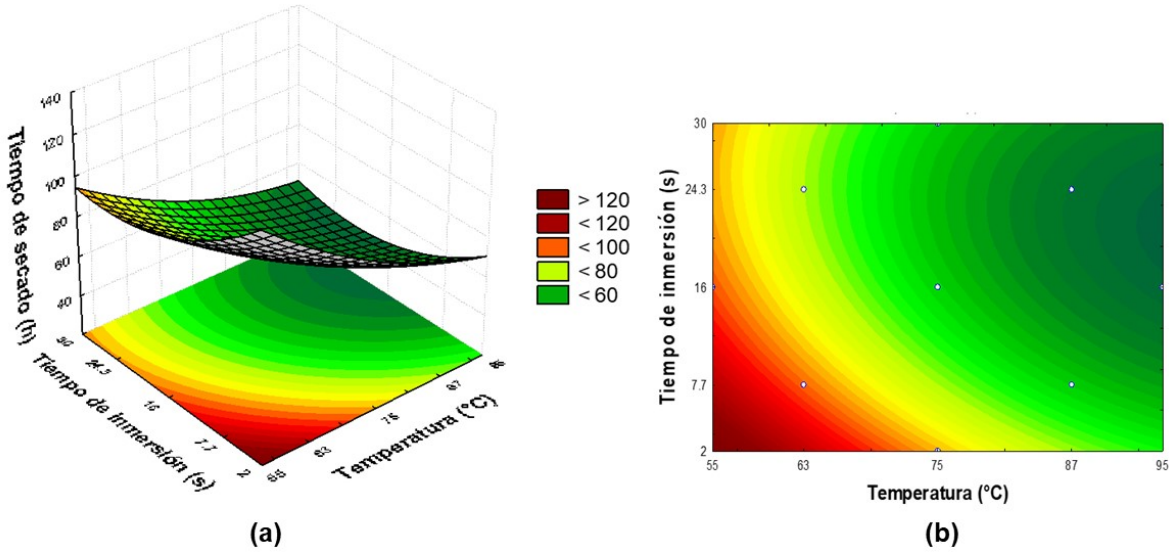


Figura 6. Superficie de respuesta del tiempo de secado (h) (a) y de contorno (b) versus temperatura (°C) y tiempo de inmersión (s) usando secador solar indirecto para el secado de la uva variedad Moscatel de Alejandría.

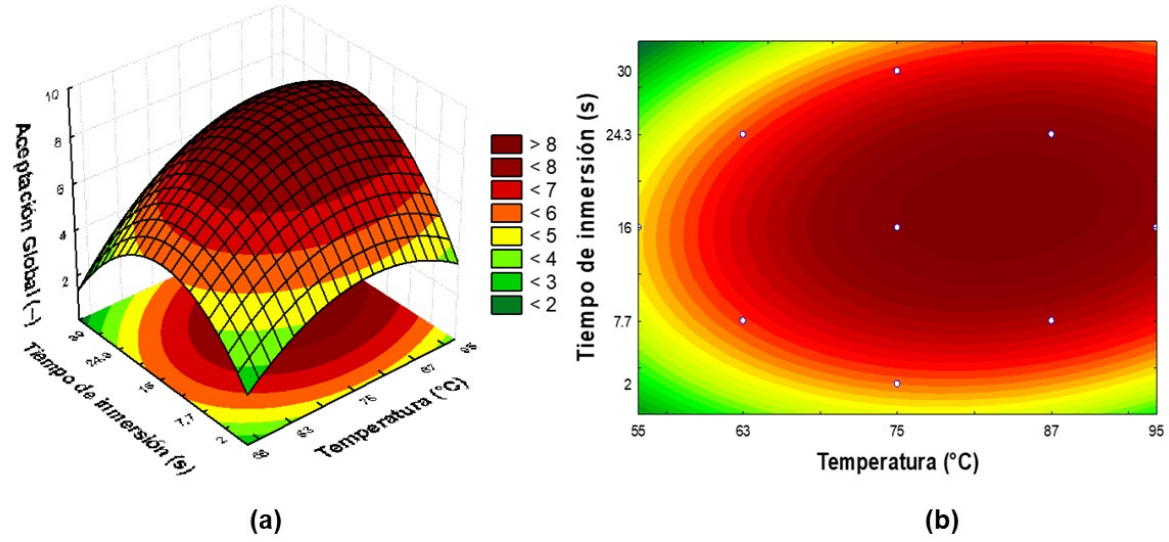


Figura 7. Superficie de respuesta de la aceptación global (a) y de contorno (b) de la uva-pasa variedad Moscatel de Alejandría versus temperatura (°C) y tiempo de inmersión (s) para el secado usando secador solar indirecto.

Las curvas muestran una inflexión, dando un valor máximo del grado de aceptación de la uva-pasa para concentraciones del 1 y 1.5%, respectivamente, correspondiendo los valores más altos del grado de aceptación a aproximadamente 16 segundos. Los parámetros del proceso de secado solar indirecto se presentan en la Tabla 9.

A diferencia del secado al sol, el proceso de secado solar indirecto permite reducir en 20 horas el tiempo de secado, obteniéndose pasas con una elevada aceptación global. Asimismo, las condiciones óptimas se encuentran cerca de los puntos centrales de la planificación experimental, donde los valores de aceptación global fueron los más elevados. Por tanto, para el análisis de la curva y cinética de secado, los datos experimentales encontrados fueron: $T = 80$ °C, $C = 1.5\%$ y $t = 16$ s.

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Tabla 9. Parámetros de procesamiento de secado solar indirecto de la uva variedad Moscatel de Alejandría.

Variable independiente	Parámetros de proceso	Tiempo de secado (h)	Aceptación global (–)
Temperatura (°C)	80–85	Aproximadamente ≤ 60 h	Aproximadamente > 8
Concentración (%)	1–2.5		
Tiempo de inmersión (s)	16–20		

En las Figuras 8 (a y b) se presentan las simulaciones, usando las ecuaciones de regresión para el tiempo de secado de las uvas al sol (Tabla 6) y la aceptación global del producto en el proceso de secado solar indirecto (Tabla 7), mostrando las curvaturas de los valores mínimo y máximo, respectivamente.

3.7 Curva y cinética de secado

3.7.1 Curva de secado

La Figura 9 muestra el comportamiento de la evolución del contenido de humedad en base seca en función del tiempo de secado, tanto para el secado de la variedad de uva Moscatel de Alejandría al sol como utilizando el secador solar indirecto. En la curva de secado directo al sol, el contenido de humedad de la uva disminuye gradualmente hasta alcanzar el contenido de humedad final del 20% en base húmeda, lo que supone aproximadamente 0.25 kg/kg en base seca, con un tiempo medio de secado de 75 horas. Mientras que las uvas secadas en el secador solar indirecto mostraron dos fases de secado: la primera fase pronunciada después de 24 h de secado, para luego descender gradualmente hasta el contenido de humedad final indicado, con un tiempo medio de 50 h.

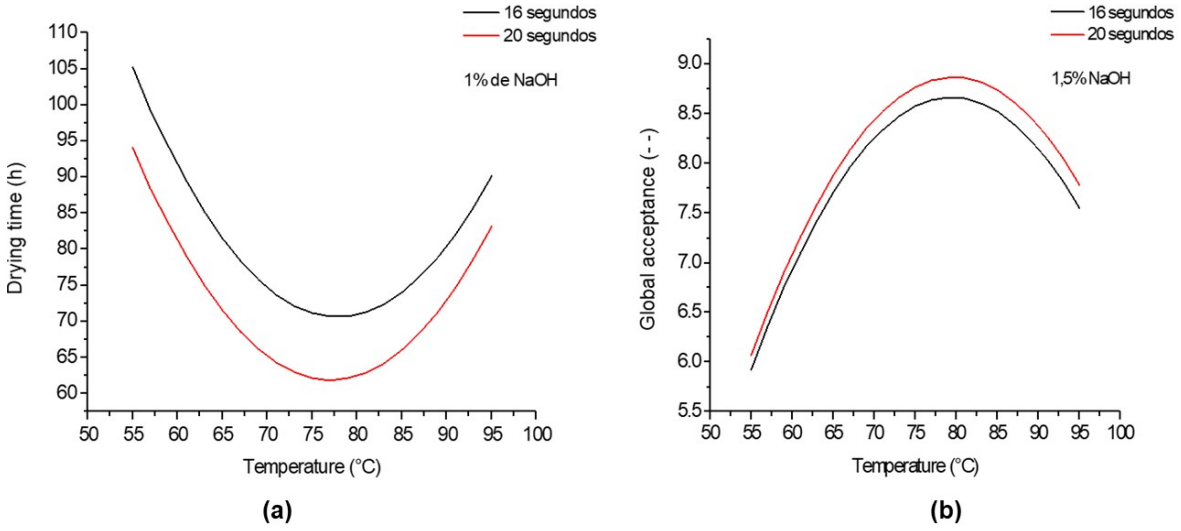


Figura 8. (a) Simulación del tiempo de secado de la uva versus la temperatura en el secado al sol (b) Simulación de la aceptación global de la uva-pasa versus la temperatura en el secado solar indirecto.

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

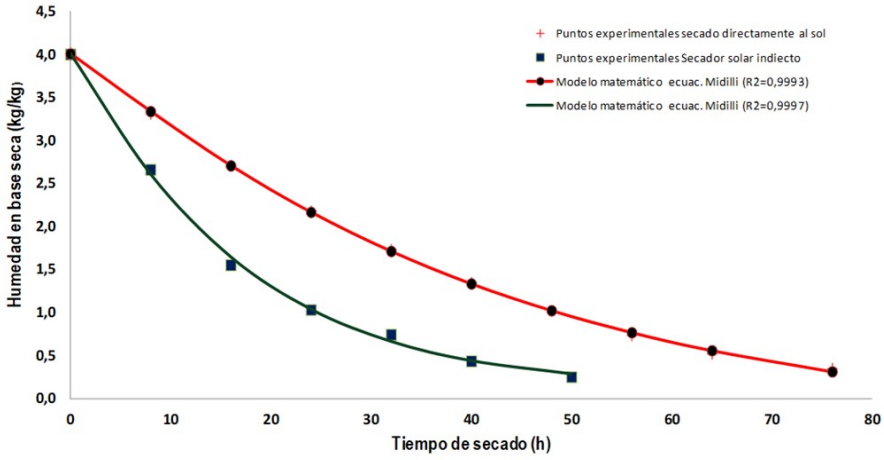


Figura 9. Evolución del contenido de humedad versus el tiempo de secado y modelamiento matemático de la curva de secado de la uva variedad Moscatel de Alejandría.

Generalmente, durante el proceso de secado hay tres fases consecutivas: la fase inicial, donde la tasa de secado aumenta debido a la temperatura ganada por el producto y el consecuente aumento de la presión de vapor; una segunda fase, donde la tasa de secado es constante; y una fase final, que presenta una tasa de secado muy disminuida (Barbosa de Lima y cols., 2016). Estas fases se evidenciaron en el secado de uvas Moscatel de Alejandría pretratadas con solución de NaOH (80 g/L) a una temperatura de 25 °C, durante un tiempo de inmersión de 360 s; donde el secado convectivo se realizó a una temperatura de 30 °C durante 13 días (Corona y cols., 2016).

La primera fase de la curva, presentada por el secado solar indirecto, responde a cambios microestructurales en la capa de cera epicuticular que recubre la cutícula de la uva, provocados por el pretratamiento con NaOH; dentro de estos cambios se destaca la formación de grietas en la piel y el ablandamiento general del tejido, mejorando la permeabilidad de la piel y la difusión de la humedad (Lara y cols., 2014). En la fase dos se experimenta por el cierre progresivo de las grietas a medida que la uva se encoge y el azúcar de la pulpa migra hacia la piel, donde actúa como barrera a la difusión del agua, pudiendo superar este efecto retardante con el aumento de la temperatura de secado por encima de 40 °C (Azzouz y cols., 2002; Giordano y cols., 2009; Toğrul, 2010). En tanto, la curva mostrada para secado al sol presenta un comportamiento casi lineal, influenciado solo por el tipo de proceso. Por lo que, el secador solar y el tratamiento químico-térmico del proyecto de investigación permitió reducir el tiempo de secado tradicional en un 33 %, en cambio Serratosa y cols. (2008) lograron una reducción del 25 %, durante el secado en cámara a 50 °C de uvas Pedro Ximénez pretratadas en medio alcalino.

En la misma figura se presenta el ajuste de los datos experimentales de la humedad versus el tiempo de secado, usando la ecuación de Midilli y cols. (2002) para la modelación de la curva de secado. Para la elección del modelo se consideraron los valores de los coeficientes de determinación (R^2) y el valor de los errores: suma de los errores cuadráticos (SSE) que fue usada como celda para el uso del Solver, la raíz media de los errores cuadráticos (RMSE), el error porcentual medio relativo (EMR) y el valor de Chi-cuadrado reducido (χ^2) (Mehta, 2023).

Podemos afirmar que el modelo de Midilli y cols. (2002) es el que mejor simula la distribución de los datos experimentales de la curva de secado de la variedad de uva Moscatel de Alejandría, porque presentaron los valores más altos del coeficiente de determinación y los valores más bajos de los errores relativos calculados. Los resultados se presentan en las Tablas 10 y 11.

Martín-Gómez y cols. (2019) modelizaron el secado de uvas enteras de la variedad Tempranillo en cámara a 50 °C con una humedad relativa del

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

20 %. Para ello, evaluaron los modelos de Newton, Henderson-Pabis, logarítmico, Wang y Singh, aproximación por difusión y Midilli y cols. (2002) siendo este último el modelo seleccionado con base en los valores de R^2, SSE, RMSE, EMR (%) y χ^2.

El modelo matemático propuesto por Midilli y cols. (2002) es un modelo adecuado para representar el comportamiento de secado de uvas y tomates (Doymaz, 2004; Midilli y cols., 2002; Yaldiz y cols., 2001).

Tabla 10. Parámetros de ajuste de los modelos matemáticos para la curva de secado de la uva variedad Moscatel de Alejandría – secado al sol.

Modelos	**Parámetros**		R^2	**SSE**	**RMSE**	**EMR (%)**	χ^2
Henderson y Pabis	*a*	1.0291	0.99366	0.0091	0.0952	4.168	0.0113
	k	0.0290					
Henderson-Pabis Modificado	*a*	0.3716	0.99367	0.0091	0.0952	4.803	0.0226
	k	0.0290					
	b	0.2859					
	g	0.0290					
	c	0.3716					
	h	0.0290					
Page	*k*	0.0154	0.99890	0.0016	0.0398	1.212	0.00198
	n	1.1671					
Page Modificado	*k*	0.0218	0.99190	0.0112	0.1060	6.503	0.01404
	n	1.2897					
Newton	*k*	0.0281	0.99190	0.0112	0.1060	7.219	0.01248
	a	0.9972					
Midilli *et al.*	*k*	0.0182	0.99928	0.0006	0.0242	0.096	0.00098
	n	1.0938					
	b	-0.00068					

3.7.2 Cinética de secado

Al graficar la velocidad de secado de la uva variedad Moscatel de Alejandría versus la humedad absoluta media y el tiempo de secado, tal como se presenta en la Figura 10 (a y b), respectivamente, se observa que los valores más altos de la cinética de secado corresponden a las primeras 10 h de secado de 0.18 y 0.08 kg/(kg · h), que corresponden a las pendientes de dR/dt de 0.250 y 0.253 para el secado al sol y el secado solar indirecto, respectivamente. Observándose solo el periodo de velocidad de secado decreciente con ajuste lineal en ambos procesos.

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Tabla 11. Parámetros de ajuste de los modelos matemáticos para la curva de secado de la uva variedad Moscatel de Alejandría usando secador solar indirecto.

Modelos	Parámetros		R^2	SSE	RMSE	EMR (%)	χ^2
Henderson y Pabis	a	1.0060	0.99797	0.0032	0.0567	0.048	0.00451
	k	0.0564					
Henderson-Pabis Modificado	a	0.0765	0.99796	0.0032	0.0568	0.352	0.02259
	k	0.0646					
	b	0.8537					
	g	0.0552					
	c	0.0765					
	h	0.0646					
Page	k	0.0519	0.99806	0.0031	0.0556	1.193	0.00433
	n	1.0256					
Page Modificado	k	0.2369	0.99792	0.0033	0.0576	0.265	0.00464
	n	0.2369					
Newton	k	0.0561	0.99792	0.0033	0.0576	0.455	0.00387
	a	1.0023					
Midilli *et al.*	k	0.0841	0.99973	0.0028	0.0529	0.393	0.00652
	n	1.0626					
	b	0.00038					

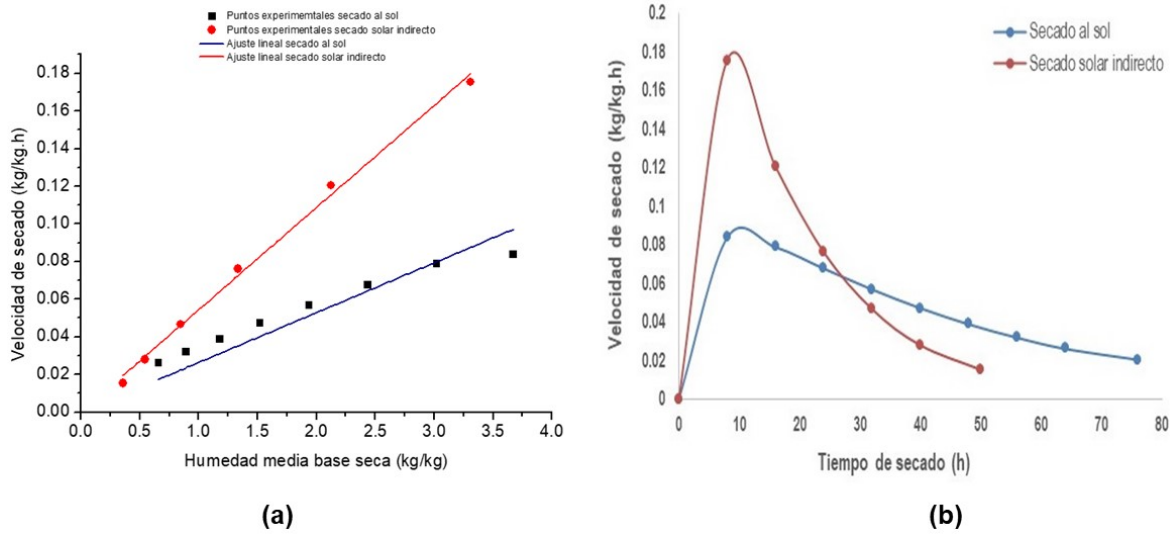


Figura 10. (a) Velocidad de secado versus la humedad media en el secado al sol y solar indirecto; (b) Velocidad de secado versus el tiempo de secado en el secado al sol y el secado solar indirecto de la uva variedad Moscatel de Alejandría.

3.7.3 Valor de la difusividad efectiva del agua

Haciendo uso de la Ecuación 8 se determinaron las pendientes del ln(MR) versus el tiempo, para la determinación de la difusividad efectiva del agua (m^2/s). Para el cálculo de la difusividad se utilizó el valor medio del radio de la uva de 0.009693 m. Sien-

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

do los valores de la difusividad efectiva del agua de la uva de la variedad Moscatel de Alejandría de 8.57×10^{-11} y 1.90×10^{-10} m^2/s para el secado al sol y el secado solar indirecto, respectivamente. Los valores calculados de difusividad efectiva se encuentran en el rango deseado para el secado de materiales alimentarios de 10^{-12} a 10^{-8} m^2/s (Zhao y cols., 2019). Se observó que la difusividad del agua de la uva era 2.2 veces mayor en el secador solar indirecto que en el secado directo al sol. En general, las uvas pretratadas presentan una mayor difusividad del agua; en el caso de uvas enteras punzonadas y secadas a 50 °C se presentó un valor de difusividad efectiva de 7.31×10^{-11} m^2/s, y en uvas enteras sin pretratar y secadas a la misma temperatura, su difusividad alcanzó 3.22×10^{-11} m^2/s (Martín-Gómez y cols., 2019).

Sin embargo, los valores del coeficiente de determinación calculados fueron de 0.6933 y 0.7647 para el modelo difusional del secado al sol y solar indirecto, tal como se observa en la Figura 11 a y b, evidenciándose una desventaja en el ajuste a los datos experimentales, típico en los productos agroindustriales por efecto del encogimiento y los planos de humedades transitorias que ocurren en el interior del producto durante el secado (Doymaz, 2007).

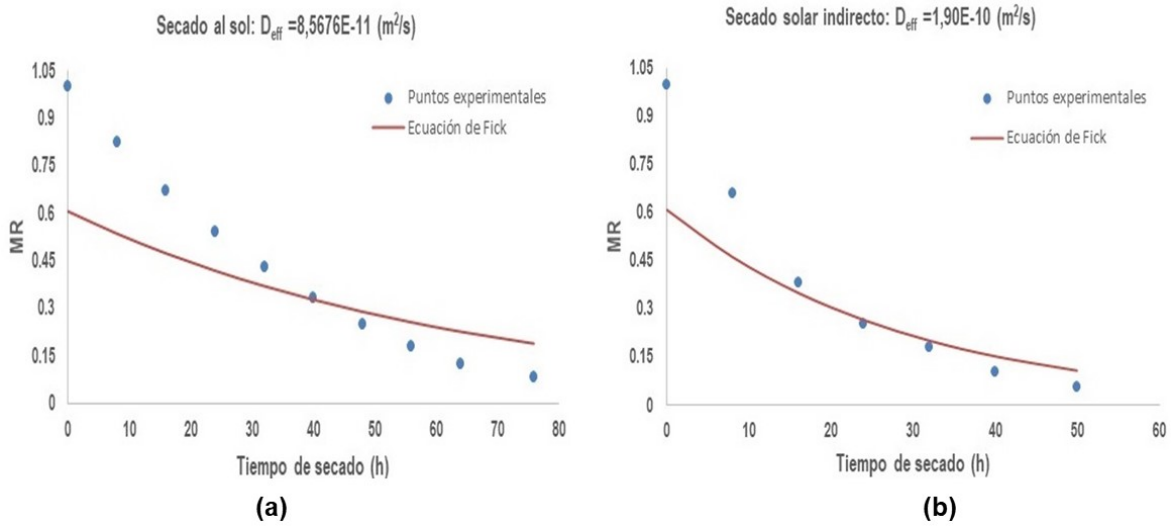


Figura 11. (a) Modelamiento matemático difusional de la curva de secado al sol y (b) solar indirecto de la uva variedad Moscatel de Alejandría.

4 Conclusiones

Se estudió el secado de la variedad de uva Moscatel de Alejandría (*Vitis vinifera*) mediante dos procesos: secado al sol y secado solar indirecto utilizando un secadero con colector solar de superficie extendida. Previo al secado, se realizó un pretratamiento alcalino en el rango de temperaturas de 55–95 °C, concentración de NaOH de 0.50–3.0 % y tiempos de inmersión de 2–30 s.

Se optimizaron el secado al sol y el secado solar indirecto, considerando condiciones de pretratamiento de 80 °C, 1.75 % y 16 s para obtener tiempos aproximados de secado de 75 h y 50 h, respectivamente, con un alto grado de aceptación global del producto y una puntuación superior a 8 puntos para la escala hedónica establecida para ambos procesos. En condiciones óptimas de secado, el modelo matemático de Midilli y cols. (2002) resultó ser el modelo matemático que mejor simuló la curva de secado de la uva, ya que presenta los valores más altos del coeficiente de determinación y los valores más bajos de los errores relativos calculados. Se determinaron valores de difusividad efectiva del agua de la uva de 8.57×10^{-11} y 1.90×10^{-10} m^2/s para el secado directamente al sol y utilizando un secador solar indirecto, respectivamente.

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Agradecimientos

La investigación fue realizada gracias al apoyo del Laboratorio de Ingeniería de Procesos y Operaciones Unitarias (LIPOU-FIPA) perteneciente a la Facultad de Ingeniería Pesquera y de Alimentos de la Universidad Nacional del Callao, Lima, Perú.

Declaración de uso de inteligencia artificial

Los autores DECLARAN que, durante la preparación del artículo titulado «Aplicación de un Modelo de superficie de respuesta en el secado al sol y solar indirecto de uvas variedad moscatel de alejandria (*Vitis vinífera*)», no se utilizaron herramientas de inteligencia artificial generativa ni sistemas automatizados de asistencia para la redacción, análisis, interpretación de datos, generación de contenido, traducción o edición del manuscrito.

Los autores asumen plena responsabilidad por el contenido, la originalidad, la integridad y la versión final del artículo.

Contribución de los autores

D.V.P.: Conceptualización, Procesamiento de datos, Análisis formal, Investigación, Metodología, Supervisión. **H.R.N.:** Conceptualización, Procesamiento de datos, Análisis formal, Investigación, Metodología. **R.S.J.:** Conceptualización, Procesamiento de datos, Análisis formal, Investigación, Metodología. **D.C.R.:** Conceptualización, Procesamiento de datos, Análisis formal, Investigación, Metodología.

Referencias

Adiletta, G., Russo, P., Senadeera, W., y Di Matteo, M. (2016). Drying characteristics and quality of grape under physical pretreatment. *Journal of Food Engineering*, *172*, 9–18. Online: https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.06.031

Atak, A., Göksel, Z., Tunçkal, C., y Yılmaz, Y. (2022). Comparison of important quality characteristics of some fungal disease resistance/tolerance grapes dried with energy-saving heat pump dryer. *Agronomy*, *12*(4), 909. Online: https://doi.org/10.3390/agronomy12040909

Azzouz, S., Guizani, A., Jomaa, W., y Belghith, A. (2002). Moisture diffusivity and drying kinetic equation of convective drying of grapes. *Journal of Food Engineering*, *55*(4), 323–330. Online: https://doi.org/10.1016/S0260-8774(02)00109-7

Barbosa de Lima, A. G., Delgado, J. M. P. Q., Neto, S. R. F., y Franco, C. M. R. (2016). Intermittent drying: Fundamentals, modeling and applications. En J. M. P. Q. Delgado y A. G. Barbosa de Lima (Eds.), *Drying and energy technologies* (pp. 19–41). Cham: Springer International Publishing. Online: https://doi.org/10.1007/978-3-319-19767-8_2

Bitaraf, M. S., Khodaiyan, F., Mohammadifar, M. A., y Mousavi, S. M. (2012). Application of response surface methodology to improve fermentation time and rheological properties of probiotic yogurt containing *Lactobacillus reuteri*. *Food and Bioprocess Technology*, *5*(4), 1394–1401. Online: https://doi.org/10.1007/s11947-010-0433-2

Bombana, V. B., Fischer, B., Oro, C. E. D., Rigo, D., Polina, C. C., Franco Denti, A., … others (2023). Drying kinetics of guabiju pulp (*Myrcianthes pungens*): Mass transfer parameters, mathematical modeling and evaluation of bioactive compounds. *Journal of Food Process Engineering*, *46*(1), e14205. Online: https://doi.org/10.1111/JFPE.14205

Castillo-Téllez, M., Pilatowsky-Figueroa, I., López-Vidaña, E. C., Sarracino-Martínez, O., y Hernández-Galvez, G. (2017). Dehydration of the red chilli (*Capsicum annuum L.*, costeño) using an indirect-type forced convection solar dryer. *Applied Thermal Engineering*, *114*, 1137–1144. Online: https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2016.08.114

Chen, K., Hu, Y., Chen, L., Zhang, J., Qiao, H., Li, W., … others (2022). Role of dehydration temperature on flavonoids composition and free-form volatile profile of raisins during the drying process. *Food Chemistry*, *374*, 131747. Online: https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131747

Chopra, R., Rastogi, N. K., y Sambaiah, K. (2011). Enrichment of rice bran oil with α-linolenic acid

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

by enzymatic acidolysis: Optimization of parameters by response surface methodology. *Food and Bioprocess Technology*, *4*(7), 1153–1163. Online: https://doi.org/10.1007/s11947-009-0191-1

Corona, O., Planeta, D., Bambina, P., Giacosa, S., Paissoni, M. A., Squadrito, M., … others (2020). Influence of different dehydration levels on volatile profiles, phenolic contents and skin hardness of alkaline pre-treated grapes cv muscat of alexandria (*Vitis vinifera L.*). *Foods*, *9*(5), 666. Online: https://doi.org/10.3390/foods9050666

Corona, O., Torchio, F., Giacosa, S., Río Segade, S., Planeta, D., Gerbi, V., … others (2016). Assessment of postharvest dehydration kinetics and skin mechanical properties of 'muscat of alexandria' grapes by response surface methodology. *Food and Bioprocess Technology*, *9*(6), 1060–1069. Online: https://doi.org/10.1007/s11947-016-1697-y

Crank, J. (1975). *The mathematics of diffusion* (2nd ed.). London, UK: Oxford University Press.

Deng, L.-Z., Mujumdar, A. S., Zhang, Q., Yang, X.-H., Wang, J., Zheng, Z.-A., … Xiao, H.-W. (2019). Chemical and physical pretreatments of fruits and vegetables: Effects on drying characteristics and quality attributes – a comprehensive review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, *59*(9), 1408–1432. Online: https://doi.org/10.1080/10408398.2017.1409192

Di Matteo, M., Cinquanta, L., Galiero, G., y Crescitelli, S. (2000). Effect of a novel physical pretreatment process on the drying kinetics of seedless grapes. *Journal of Food Engineering*, *46*(2), 83–89. Online: https://doi.org/10.1016/S0260-8774(00)00071-6

Djebli, A., Hanini, S., Badaoui, O., Haddad, B., y Benhamou, A. (2020). Modeling and comparative analysis of solar drying behavior of potatoes. *Renewable Energy*, *145*, 1494–1506. Online: https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.07.083

Doymaz, İ. (2004). Convective air drying characteristics of thin layer carrots. *Journal of Food Engineering*, *61*(3), 359–364. Online: https://doi.org/10.1016/S0260-8774(03)00142-0

Doymaz, İ. (2007). Air-drying characteristics of tomatoes. *Journal of Food Engineering*, *78*(4), 1291–1297. Online: https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.12.047

EL-Mesery, H. S., EL-Seesy, A. I., Hu, Z., y Li, Y. (2022). Recent developments in solar drying technology of food and agricultural products: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *157*, 112070. Online: https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.112070

FAO. (2020). *FaoStat database.* Online: http://www.fao.org/faostat/

Giordano, M., Rolle, L., Zeppa, G., y Gerbi, V. (2009). Chemical and volatile composition of three Italian sweet white Passito wines. *OENO One*, *43*(3), 159–170. Online: https://doi.org/10.20870/OENO-ONE.2009.43.3.796

Gopinath, G. R., Muthuvel, S., Muthukannan, M., Sudhakarapandian, R., Praveen Kumar, B., Santhan Kumar, C., y Thanikanti, S. B. (2022). Design, development, and performance testing of thermal energy storage based solar dryer system for seeded grapes. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, *51*, 101923. Online: https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101923

Gunasekaran, N., Manoj Kumar, P., Raja, S., Sharavanan, S., Avinas, K., Aakash Kannan, P., y Gokul, S. (2021). Investigation on ETC solar water heater using twisted tape inserts. *Materials Today: Proceedings*, *47*, 5011–5016. Online: https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2021.04.586

Harutyunyan, M., Viana, R., Granja-Soares, J., Martins, M., Ribeiro, H., y Malfeito-Ferreira, M. (2022). Adaptation of ancient techniques to recreate 'wines' and 'beverages' using withered grapes of Muscat of Alexandria. *Fermentation*, *8*(2), 85. Online: https://doi.org/10.3390/fermentation8020085

Javed, H. U., Wang, D., Abdullah, Hasan, M., Zeng, L. Y., Lan, Y., … others (2023). Interrogating raisin associated unsaturated fatty acid derived volatile compounds using HS–SPME with GC–MS. *Foods*, *12*(3), 428. Online: https://doi.org/10.3390/foods12030428

Kumar, P. M., Arunthathi, S., Jeevan Prasanth, S., Aswin, T., Anish Antony, A., Daniel, D., … others (2021). Investigation on a desiccant based solar water recuperator for generating water from

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

atmospheric air. *Materials Today: Proceedings*, *45*, 7881–7884. Online: https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2020.12.506

Kusuma, H. S., Nasution, R. A., y Permatasari, D. (2023). Drying process on kaffir lime leaves using microwave: Evaluation of the drying performance and energy analysis of different microwave powers and sizes of leaves. *Applied Food Research*, 100317. Online: https://doi.org/10.1016/j.afres.2023.100317

Lara, I., Belge, B., y Goulao, L. F. (2014). The fruit cuticle as a modulator of postharvest quality. *Postharvest Biology and Technology*, *87*, 103–112. Online: https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2013.08.012

Leon Dharmadurai, P., Vasanthaseelan, S., Bharathwaaj, R., Dharmaraj, V., Gnanasekaran, K., Balaji, D., y Sathyamurthy, R. (2022). A comparative study on solar dryer using external reflector for drying grapes. *Materials Today: Proceedings*, *50*, 552–559. Online: https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.197

Martín-Gómez, J., Ángeles Varo, M., Mérida, J., y Serratosa, M. P. (2019). The influence of berry perforation on grape drying kinetics and total phenolic compounds. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *99*(9), 4260–4266. Online: https://doi.org/10.1002/jsfa.9657

Mehta, P. (2023). Drying kinetics with proposed model study for grapes drying in solar dryer—a case study. En S. Bhattacharyya y H. Chattopadhyay (Eds.), *Fluid mechanics and fluid power (vol. 1)* (pp. 13–18). Singapore: Springer Nature Singapore.

Midilli, A., Kucuk, H., y Yapar, Z. (2002). A NEW MODEL FOR SINGLE-LAYER DRYING. *Drying Technology*, *20*(7), 1503–1513. Online: https://doi.org/10.1081/DRT-120005864

Myers, R. H., Montgomery, D. C., y Anderson-Cook, C. M. (2016). *Response surface methodology: Process and product optimization using designed experiments*. John Wiley & Sons.

Naigam, A. P. V., Ridzuan, I. M. B., Tan, A. S. T., Abdullah, A., Wan Ismail, W. A. A. Z., y Janaun, J. (2021). Design, development and performance evaluation of a large-scale hybrid solar dryer. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *1070*(1), 012016. Online: https://doi.org/10.1088/1757-899X/1070/1/012016

Patidar, A., Vishwakarma, S., y Meena, D. (2021). Traditional and recent development of pretreatment and drying process of grapes during raisin production: A review of novel pretreatment and drying methods of grapes. *Food Frontiers*, *2*(1), 46–61. Online: https://doi.org/10.1002/fft2.64

Pedrosa-López, M. d. C., Aragón-García, F., Ruíz-Rodríguez, A., Piñeiro, Z., Durán-Guerrero, E., y Palma, M. (2022). Effects from the freezing of either whole or crushed grapes on the volatile compounds contents in Muscat wines. *Foods*, *11*(12), 1782. Online: https://doi.org/10.3390/foods11121782

Pragati, S., y Preeti, B. (2012). Technological revolution in drying of fruit and vegetables. *International Journal of Science and Research (IJSR)*, *3*.

Ramos, I. N., Brandão, T. R. S., y Silva, C. L. M. (2015). Simulation of solar drying of grapes using an integrated heat and mass transfer model. *Renewable Energy*, *81*, 896–902. Online: https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.04.011

Rizvi, S. S. H. (1986). *Engineering properties of foods*. New York, NY: Marcel Dekker.

Saravacos, G. D., y Maroulis, Z. B. (2001). *Transport properties of foods*. New York: Marcel Dekker Inc.

Serratosa, M. P., Lopez-Toledano, A., Medina, M., y Merida, J. (2008). Drying of Pedro Ximenez grapes in chamber at controlled temperature and with dipping pretreatments. changes in the color fraction. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *56*(22), 10739–10746. Online: https://doi.org/10.1021/jf8021767

Shalaby, S. M., y Bek, M. A. (2014). Experimental investigation of a novel indirect solar dryer implementing PCM as energy storage medium. *Energy Conversion and Management*, *83*, 1–8. Online: https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.03.043

Singh, S. P., Jairaj, K. S., y Srikant, K. (2012). Universal drying rate constant of seedless grapes: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *16*(8), 6295–6302. Online: https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.07.011

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Srikiatden, J., y Roberts, J. S. (2006). Measuring moisture diffusivity of potato and carrot (core and cortex) during convective hot air and isothermal drying. *Journal of Food Engineering*, *74*(1), 143–152. Online: https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.02.026

Srivastava, A., Anand, A., Shukla, A., Kumar, A., Buddhi, D., y Sharma, A. (2021). A comprehensive overview on solar grapes drying: Modeling, energy, environmental and economic analysis. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, *47*, 101513. Online: https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101513

Subbian, V., Murugavel, K. K., Raja, R. S., y Shanawaz, A. M. (2021). Experimental investigation and the performance evaluation of a mixed mode solar dryer for coconut. *Materials Today: Proceedings*, *45*, 3662–3665. Online: https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.157

Toğrul, İ. T. (2010). Modelling of heat and moisture transport during drying black grapes. *International Journal of Food Science & Technology*, *45*(6), 1146–1152. Online: https://doi.org/10.1111/J.1365-2621.2010.02246.X

Vázquez, G., Chenlo, F., Costoyas, R. M., y Costoyas, A. (2000). EFFECTS OF VARIOUS TREATMENTS ON THE DRYING KINETICS OF Muscatel GRAPES. *Drying Technology*, *18*(9), 2131–2144. Online: https://doi.org/10.1080/07373930008917830

Vigneshkumar, N., Venkatasudhahar, M., Manoj Kumar, P., Ramesh, A., Subbiah, R., Michael Joseph Stalin, P., … others (2021). Investigation on indirect solar dryer for drying sliced potatoes using phase change materials (PCM). *Materials Today: Proceedings*, *47*, 5233–5238. Online: https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.05.562

Wang, J., Mu, W.-S., Fang, X.-M., Mujumdar, A. S., Yang, X.-H., Xue, L.-Y., … others (2017). Pulsed vacuum drying of Thompson seedless grape: Effects of berry ripeness on physicochemical properties and drying characteristic. *Food and Bioproducts Processing*, *106*, 117–126. Online: https://doi.org/10.1016/j.fbp.2017.09.003

Yaldiz, O., Ertekin, C., y Uzun, H. I. (2001). Mathematical modeling of thin layer solar drying of sultana grapes. *Energy*, *26*(5), 457–465. Online: https://doi.org/10.1016/S0360-5442(01)00018-4

Zhao, D., Wei, J., Hao, J., Han, X., Ding, S., Yang, L., y Zhang, Z. (2019). Effect of sodium carbonate solution pretreatment on drying kinetics, antioxidant capacity changes, and final quality of wolfberry (*Lycium barbarum*) during drying. *LWT*, *99*, 254–261. Online: https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.09.066

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

La Granja:
Revista de
Ciencias de la Vida
pISSN:1390-3799; eISSN:1390-8596
https://doi.org/10.17163/lgr.n44.2026.08

Reseña bibliográfica / Review

Ciencias Agrícolas

CC BY NC SA

ABYA YALA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Manejo integrado de *Zabrotes subfasciatus* en el frijol común (*Phaseolus vulgaris*), desafíos y estrategias de control para la seguridad alimentaria

Integrated Management of *Zabrotes subfasciatuss* in Common Bean (*Phaseolus vulgaris*), Challenges and Control Strategies for Food Security

Luis David Jarquín-Izaguirre*[1], Luisa Fernanda Correa Díaz[1] y Saul Alejandro Jarquín-Izaguirre[2]

[1]*Programa de Maestría en Agricultura Tropical Sostenible, Departamento de Posgrado, Universidad Zamorano, 04001, Tegucigalpa, Honduras. [*https://ror.org/01kt2cx88*]*
[2]*Departamento de Agroindustria, Universidad Nacional Autónoma de Honduras, 04001, El Paraíso, Honduras. [*https://ror.org/03xyve152*]*

*Autor para correspondencia: luis.jarquin@est.zamorano.edu

Manuscrito recibido el 14 de noviembre de 2024. Aceptado, tras revisión el 24 de octubre de 2025. Publicado el 1 de septiembre de 2026.

Resumen

El manejo integrado del *Zabrotes subfasciatus* en frijol común (*Phaseolus vulgaris*) es crucial, debido a su amplia distribución y el daño significativo que causa en granos almacenados. Su manejo integrado busca reducir las pérdidas y garantizar la seguridad alimentaria. El objetivo de esta revisión es comprender la biología de *Z. subfasciatus*, identificar métodos de control eficaces y proponer un modelo integral que reduzca el uso de insecticidas químicos. Se realizó una revisión sistemática de literatura científica publicada a partir del año 2000, evaluando 653 estudios iniciales, de los cuales 61 cumplieron con los criterios de inclusión. Se abordaron aspectos como la taxonomía, distribución geográfica, ciclo de vida y métodos de control de la plaga, a partir de información recopilada en bases de datos como ScienceDirect, Elsevier y SciELO. Los resultados principales evidenciaron que un enfoque de manejo integrado, que combine métodos culturales, físicos, químicos y fitogenéticos, es eficaz para controlar la plaga sin depender exclusivamente de insecticidas químicos, cuyo uso indiscriminado representa un riesgo para la salud humana y el ambiente. El monitoreo y el desarrollo de variedades resistentes de frijol se destacan como prácticas fundamentales en el manejo de la plaga. En conclusión, el manejo integrado de *Z. subfasciatus* aporta significativamente a la protección de los granos almacenados y, por ende, a la seguridad alimentaria de las comunidades agrícolas. Se recomienda fortalecer la capacitación de los agricultores en técnicas sostenibles de control y promover la investigación en métodos alternativos de manejo.

Palabras clave: Almacenamiento, control de plaga, entomología, frijol, insecto.

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Abstract

Integrated management of *Zabrotes subfasciatus* in common bean (*Phaseolus vulgaris*) is crucial due to its wide distribution and the significant damage it causes to stored grains. The goal of integrated management is to reduce losses and ensure food security. This review aimed to understand the biology of *Z. subfasciatus*, identify effective control methods, and propose an integrated model that minimizes the use of chemical insecticides. A systematic review of scientific literature published since 2000 was conducted, evaluating 653 initial studies, of which 61 met the inclusion criteria. Key aspects such as taxonomy, geographic distribution, life cycle, and pest control methods were addressed using information from databases such as ScienceDirect, Elsevier, and SciELO. The main findings showed that an integrated management approach combining cultural, physical, chemical, and genetic methods is effective in controlling the pest without relying solely on chemical insecticides, whose indiscriminate use poses risks to human health and the environment. Monitoring and the development of resistant bean varieties stand out as fundamental practices in pest management. In conclusion, integrated management of *Z. subfasciatus* significantly contributes to the protection of stored grains and, consequently, to the food security of farming communities. It is recommended to strengthen farmer training in sustainable control techniques and to promote research on alternative management methods.

Keywords: Storage, pest control, entomology, bean, insect.

Forma sugerida de citar: Jarquín, L., Correa, L. y Jarquín, S. (2026). Manejo integrado de *Zabrotes subfasciatus* en el frijol común (*Phaseolus vulgaris*), desafíos y estrategias de control para la seguridad alimentaria. *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida.* Vol. 44(2):139-153. https://doi.org/10.17163/lgr.n44.2026.08.

Orcid IDs:

Luis David Jarquín-Izaguirre: https://orcid.org/0009-0001-9970-8548
Luisa Fernanda Correa Díaz: https://orcid.org/0009-0001-3577-2399
Saul Alejandro Jarquín-Izaguirre: https://orcid.org/0009-0002-3819-099X

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

1 Introducción

El frijol común (*Phaseolus vulgaris*) es la leguminosa más importante utilizada para el consumo humano directo (Didinger y cols., 2022). Miembro de la familia Fabaceae, el frijol común es una especie predominantemente autopolinizadora, originaria de Mesoamérica (Bitocchi y cols., 2017). Debido a su amplia dispersión geográfica, este grano ancestral se dividió y evolucionó en dos reservorios genéticos domesticados: el mesoamericano y el andino. Las variedades de mayor calidad se desarrollaron y fueron domesticadas en Sudamérica, a partir del acervo genético andino, mientras que las de menor calidad se originaron en México y Centroamérica, con raíces en el acervo genético mesoamericano (Wilker y cols., 2020). Gracias a esta diversidad genética y a su capacidad de adaptación, el frijol común se ha consolidado como uno de los cultivos más relevantes para la alimentación humana a nivel mundial (Refaay y cols., 2021). Su alto valor nutricional lo convierte en un alimento esencial, especialmente en América Latina y en países en vías de desarrollo (Hernández-Ochandía y cols., 2018), donde constituye una fuente importante de proteínas, vitaminas y minerales. El frijol seco contiene aproximadamente un 22% de proteínas, carbohidratos complejos (62%), fibra soluble (15%) y diversos micronutrientes como calcio, hierro, magnesio, fósforo, potasio y folato, lo que lo posiciona como un alimento clave en dietas equilibradas y saludables (Myers y Kmiecik, 2017).

En términos de producción, *P. vulgaris* representa el 85% de la producción mundial de frijoles, lo que lo convierte en la leguminosa más cultivada del planeta (Mamo y cols., 2023). Anualmente se cosechan más de 27 millones de toneladas de frijol en aproximadamente 29 millones de hectáreas a nivel mundial, alimentando a más de 300 millones de personas que dependen de las economías agrícolas en diversas regiones del mundo (Nasar y cols., 2023). América Latina destaca como la región con mayor producción y consumo, concentrando el 45% de la producción global (IICA / Proyecto Red SICTA, 2013). En esta región, el frijol no solo es un alimento básico, sino también un cultivo vital para la economía de los pequeños agricultores. Particularmente en Centroamérica, el frijol ocupa un lugar estratégico en la seguridad alimentaria y en la economía rural. Según datos de FAOSTAT, en 2022 Honduras produjo 130 906 toneladas de frijol, con un rendimiento promedio de 802 kg/ha, lo que evidencia su relevancia dentro de las economías agrícolas de la región (FAO, 2022).

A pesar de su relevancia económica y alimentaria, el cultivo enfrenta diversas tensiones bióticas y abióticas que limitan su productividad. Entre los factores bióticos, las plagas de almacenamiento *Zabrotes subfasciatus* y *Acanthoscelides obtectus* se destacan como las más destructivas en la etapa postcosecha (Tigist y cols., 2021). En particular, *Z. subfasciatus* representa una de las principales amenazas para los productores, al causar pérdidas significativas que afectan tanto la comercialización como la disponibilidad de semillas para futuras siembras (Mukankusi y cols., 2019). El manejo de estas plagas en los granos almacenados se ha basado tradicionalmente en la aplicación de insecticidas sintéticos como fosfina, piretroides y compuestos organofosforados. Sin embargo, muchos de estos productos tienen un acceso limitado para los agricultores de países en desarrollo (Agrafioti y cols., 2019; Gourgouta y cols., 2019). Además, el uso continuo e indiscriminado de plaguicidas ha generado una creciente preocupación a nivel mundial, debido a los riesgos que representa para la salud humana y el medio ambiente, lo que resalta la urgencia de implementar estrategias más sostenibles para el manejo de plagas en productos almacenados (Souza y cols., 2010).

Dado su papel fundamental en la seguridad alimentaria, la economía rural y la nutrición de millones de personas en países en desarrollo, el frijol común enfrenta el desafío de mantener su productividad frente a amenazas como *Zabrotes subfasciatus*, una de las principales plagas postcosecha. Garantizar su manejo sostenible es clave para reducir pérdidas, preservar la calidad del grano y fortalecer los medios de vida de los pequeños productores. En este contexto, el presente estudio tiene como objetivo comprender la biología de *Z. subfasciatus*, identificar métodos de control eficaces y proponer un modelo integrado de manejo que minimice el uso de insecticidas químicos, contribuyendo así a la protección del cultivo y a la sostenibilidad de los sistemas agrícolas.

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

2 Materiales y Métodos

2.1 Selección de estudios

Inicialmente se llevó a cabo una selección de términos de inclusión, identificando los temas de interés dentro del área de control de plagas en frijol, con énfasis en *Zabrotes subfasciatus*. A partir de esta identificación, se definieron los parámetros clave para la búsqueda bibliográfica. Los criterios de inclusión considerados fueron: a) artículos que abordaran la taxonomía de *Z. subfasciatus*, b) estudios sobre su biología y ciclo de vida, c) investigaciones relacionadas con su distribución geográfica y d) métodos de control (cultural, fitogenético, físico-mecánico y químico). En general, se priorizó la literatura publicada a partir del año 2000; no obstante, para temas específicos como taxonomía, morfología y fisiología, se incluyeron estudios anteriores relevantes por su contenido y validez científica.

2.2 Identificación de bases de datos

Los repositorios utilizados para identificar los artículos científicos fueron ScienceDirect, Elsevier, SciELO. Una vez que un artículo cumplía con los criterios de inclusión, se procedía al análisis y síntesis de la literatura, realizando una evaluación crítica, extrayendo datos relevantes y evidencias científicas, identificando tendencias e información fundamental sobre la especie.

2.3 Estructura de análisis

Se definió una estructura básica para organizar la información recopilada, abarcando aspectos como la taxonomía, morfología, distribución geográfica, biología y ciclo de vida, monitoreo, así como los métodos de control en almacenamiento: cultural, fitogenético, físico-mecánico y químico. Esta organización permitió abordar de manera integral el manejo de *Zabrotes subfasciatus* en *Phaseolus vulgaris*.

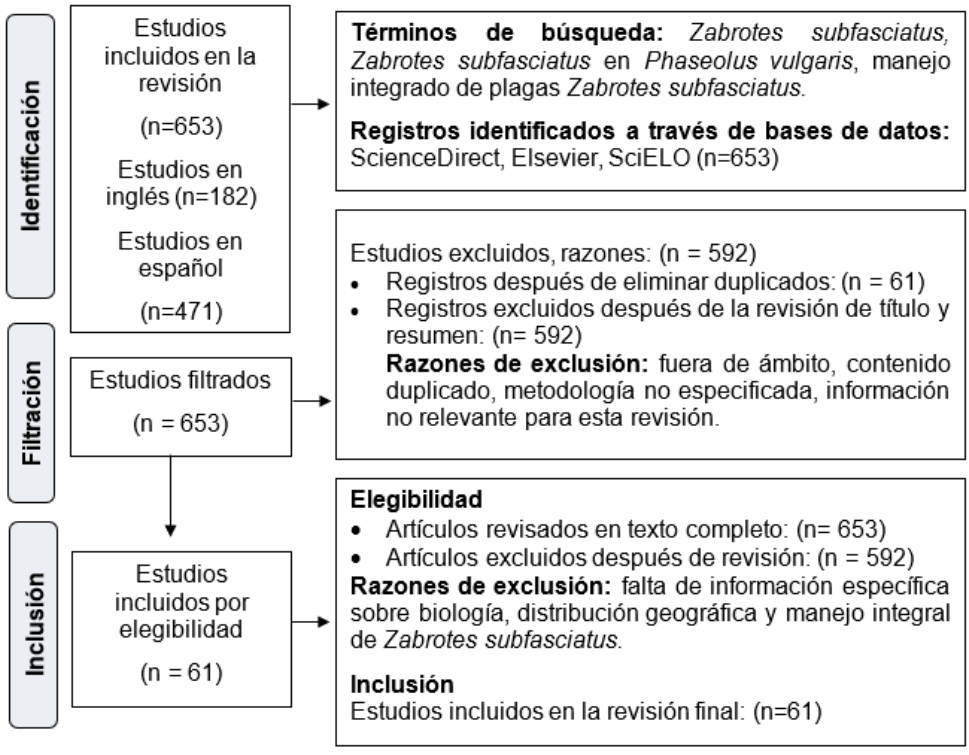


Figura 1. Diagrama de flujo PRISMA para la revisión sistemática de *Zabrotes subfasciatus* en frijol.

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

2.4 Selección final de estudios para el análisis

Para la selección de artículos, se utilizó el enfoque PRISMA para guiar el proceso de identificación, selección y documentación de los estudios incluidos en esta revisión sistemática, siguiendo la metodología propuesta por Page y cols. (2021), identificando inicialmente 653 registros a través de búsquedas en bases de datos científicas. Posteriormente, se evaluó la calidad metodológica de estos estudios mediante una lista de verificación. Esta herramienta permitió identificar posibles sesgos y valorar la validez interna, claridad metodológica y pertinencia de los estudios. Luego de eliminar artículos duplicados, se excluyeron aquellos que no cumplían con los criterios temáticos o metodológicos, finalizando con un total de 61 estudios incluidos para el análisis (Figura 1).

Tabla 1. Taxonomía de *Zabrotes subfasciatus*.

Clasificación taxonómica	
Categoría taxonómica	**Taxón al que pertenece**
Dominio	Eukarya
Reino	Animalia
Filo	Arthropoda
Clase	Insecta
Orden	Coleoptera
Suborden	Polyphaga
Superfamilia	Chrysomeloidea
Familia	Chrysomelidae
Género	*Zabrotes*
Especie	*Z. subfasciatus* (Boheman, 1833)
Nombre común	Gorgojo mexicano o pinto

Fuente: Incremento poblacional de *Zabrotes subfasciatus* en cultivares de frijol común (Cárdenas-Morales y cols., 2019).

3 Resultados y Discusión

3.1 Generalidades del cultivo del frijol

El género *Phaseolus* spp. consta de 76 especies, entre las cuales 5 son especies domésticas entre las que se encuentra *P. vulgaris* (Kaplan, 2003). Este género destaca entre las especies cultivadas, ocupando el 90% de las tierras dedicadas al cultivo de frijol a nivel mundial (Singh, 2013). Es una planta herbácea domesticada de forma independiente en la antigua Mesoamérica y los Andes (Kaplan, 1981). Se clasifica dentro del grupo de plantas dicotiledóneas (Katungi y cols., 2009). En el caso de las semillas, pueden consumirse inmaduras (tiernas), maduras, frescas o secas (Morales-Santos y cols., 2017).

Existen dos ciclos de siembra de frijoles en el año, pero principalmente los agricultores optan por cultivar durante el ciclo de postrera (octubre–diciembre). La siembra durante el ciclo de primera (mayo–septiembre) es menos común, ya que conduce a pérdidas de granos debido a la germinación o la pudrición (Torres-Treminio y Mendoza-Montoya, 2002). La postcosecha del frijol común es una etapa crítica en la cadena de producción agrícola, donde los granos están expuestos a diversos factores que pueden comprometer su calidad y cantidad. En América Central y México, se estiman pérdidas de hasta el 35% del frijol almacenado (Espinal y cols., 2021).

3.2 Taxonomía de *Zabrotes subfasciatus*

El gorgojo mexicano o pinto del frijol *Zabrotes subfasciatus* pertenece al orden Coleoptera, siendo una especie de escarabajo de hoja de la familia Chrysomelidae. Es el principal problema fitosanitario del frijol almacenado en zonas menores a 1 500 metros de altitud (Cárdenas-Morales y cols., 2019). Se

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

caracteriza por ser de metamorfosis completa y alimentarse solo de semillas (Dobie y cols., 1991).

Los miembros de esta familia son fáciles de reconocer; el cuerpo, cubierto de pequeños pelos, es compacto y globular, los élitros son cortos y con el pigidio expuesto (Rees, 2018). Tienen como hospedante principal a *Phaseolus vulgaris* en su fase de semilla; aunque también puede alimentarse de otras especies de leguminosas en condiciones de aislamiento, como es el caso de *Vigna unguiculata* L. (Ramírez Cariño y cols., 2017).

3.3 Morfología de *Zabrotes subfasciatus*

Este escarabajo presenta características distintivas tanto en machos como en hembras, las cuales son cruciales para su identificación y estudio. El cuerpo del adulto es de forma oval, grueso, convexo, de color gris-café o negro, con excepción de la base de las antenas y el ápice de los tarsos. El cuerpo mide aproximadamente entre 2 a 3 mm de longitud y de 1 a 2 mm de ancho. Sus antenas son largas y pueden llegar a medir 1.45 mm (u ocupar una proporción considerable respecto al cuerpo), cuyos artejos son largos de color negro, exceptuando los dos primeros que son de un color rojizo (Dell'Orto y Arias-Velásquez, 1985).

Los élitros son cortos y relativamente anchos, de forma cuadrada y con sus alas posteriores ocultas (Dobie y cols., 1991). La hembra es más grande que el macho y se caracteriza por tener cuatro manchas de color blanco en los élitros (Figura 2) (Arnal y Ramos, 2006). El macho es de un color gris-café uniforme (Figura 3). Su fémur posterior es liso, sin protuberancias o dientes. La parte de la tibia que se encuentra cerca al fémur presenta dos espolones móviles (Dobie y cols., 1991). Las larvas son robustas, encorvadas y de color blanco marfil; además, son muy voraces, pudiendo existir varias de ellas en un solo grano (Figura 4) (Carrera-Rodríguez y cols., 2009).



Figura 2. Imagen dorsal y lateral de la hembra *Zabrotes subfasciatus* (Johnson, 2019).



Figura 3. Imagen dorsal y lateral del macho *Zabrotes subfasciatus* (Johnson, 2019).

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.



Figura 4. Larva de *Zabrotes subfasciatus* (Johnson, 2019).

3.4 Morfología del macho

Escarabajo con un cuerpo mayormente negro, con algunas partes más claras en ciertos individuos. La cabeza tiene una pubescencia blanca con una mancha café amarillenta en el *vertex*. El pronoto y los élitros tienen pequeñas manchas café y amarillas dispersas. El abdomen es mayormente blanco, con partes café en los lados. La estructura de la cabeza muestra finas puntuaciones, con un pronoto semicircular y élitros uniformemente punteados. Las mediciones varían, pero el escarabajo generalmente tiene una longitud de 1.56 a 2.16 mm y un ancho de 1.26 a 1.62 mm. En cuanto a la genitalia, el lóbulo medio es más ancho en la base y tiene una valva ventral subtriangular. Los lóbulos laterales son más cortos y presentan una hendidura apical (Nápoles, 2018).

3.5 Morfología de la hembra

En esta especie existe un dimorfismo sexual, en la que las hembras tienen una banda media en el pronoto y una pequeña mancha blanca en cada esquina, además de una banda blanca transversal en los élitros. Sin embargo, la pubescencia en general es similar a la de los machos. La longitud de las antenas es ligeramente menor, representando entre el 0.6 y el 0.63 de la longitud del cuerpo. Las medidas típicas de longitud (pronoto-élitro) son de 2.28 a 2.46 mm, con un ancho de 1.74 a 1.86 mm y una máxima profundidad torácica de 1.26 a 1.32 mm (Nápoles, 2018).

3.6 Distribución geográfica de *Zabrotes subfasciatus*

La habilidad de esta especie para desarrollarse en condiciones de almacén le ha permitido ser una especie que sea fácil de encontrar a nivel mundial (Del Obregón y Gómez-Gutiérrez, 2023). Este insecto se distribuye ampliamente en las regiones tropicales y subtropicales de África, Madagascar, India y América, de donde se piensa es originario (Dobie y cols., 1991). En América se encuentra distribuido desde los Estados Unidos hasta Brasil (Arnal y Ramos, 2006). Principalmente se distribuye en los climas cálidos húmedos con poca altitud sobre el nivel del mar (Dell'Orto y Arias-Velásquez, 1985).

3.7 Hábitos reproductivos de *Zabrotes subfasciatus*

La hembra se aparea sexualmente con el macho, y este apareamiento parece estar influenciado por las semillas de frijol. Al contacto con estas, aumenta el número de encuentros sexuales, estimula la oogénesis (desarrollo de los óvulos) y la actividad de oviposición. Se ha documentado que los quimiorreceptores olfatorios, gustativos y táctiles regulan o controlan la actividad reproductiva de las hembras (Pimbert y Pierre, 1983).

Las hembras ovipositan en la semilla desnuda, jamás en las vainas (Credland y Dendy, 1992). Sin embargo, Pimbert y Pierre (1983) citan que sí son capaces de reproducirse en ambas partes en el campo y los almacenes. Cuando las vainas de *P. vulgaris* y

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

P. lunatus se encuentran parcial o totalmente dehiscentes permite que la hembra pueda entrar en contacto con las semillas para ovipositar. Estos mismos autores refieren que *Z. subfasciatus* no puede perforar las vainas para ovipositar en las semillas y tampoco puede ovipositar en las vainas como pueden hacerlo otros miembros de la familia. En dado caso que la hembra deposite a los huevecillos en las paredes de las vainas, estos se adhieren y la larva puede penetrar las paredes, pero muere dentro de la vaina ya que no alcanza a penetrar en la semilla (Del Obregón y Gómez-Gutiérrez, 2023).

3.8 Ciclo de vida de *Zabrotes subfasciatus*

3.8.1 Huevecillos

Las hembras ovipositan entre 35 y 60 huevos e infestan hasta 36 granos durante su ciclo reproductivo; el periodo de incubación puede ser de cuatro a ocho días, seguido del estado larval (12 días). Miden aproximadamente 0.3 mm de diámetro y son redondeados. Después de dos días de haber emergido, la hembra de *Z. subfasciatus* usualmente es cuando comienza a ovipositar (Credland y Dendy, 1992). Trabajos de Golob y Kilminster (1982) indican que la hembra presenta un periodo de pre-oviposición de 1 día; posteriormente, la hembra pone 50 huevecillos en sus 13 días de vida, siendo la mayoría puestos después del cuarto día. El huevo es fuertemente adherido a la testa del grano por medio de un material viscoso de un color brillante y translúcido que sirve de pegamento. Este pegamento o secreción que adhiere los huevecillos generalmente se deposita pocos segundos antes de la oviposición (Credland y Dendy, 1992).

3.8.2 Larvas

Son de tipo vermiforme y ápoda, tienen una longitud de 3 a 3.5 mm. Su cuerpo tiende a ser curvado, con varios pliegues, de color blanquecino, cabeza reducida y encajada en el protórax (Ascencio-Alvarado, 2012). Las larvas recién emergidas penetran al interior del grano después de consumir la mayor parte del cotiledón, construyendo un túnel y dejando únicamente una cubierta sobre el pericarpio del grano por donde posteriormente el adulto emerge (Dell'Orto y Arias-Velásquez, 1985).

3.8.3 Pupas

Miden cerca de 3 mm de largo. Son del tipo exarata, con apéndices. La diferencia de los sexos puede notarse en esta etapa por la forma del último segmento abdominal, que en la hembra es rectilíneo y en el macho arqueado (Bonet y cols., 2005; Ascencio-Alvarado, 2012). Dura entre cuatro y nueve días, pasa por último al estado adulto y posteriormente emerge por un agujero que hace en la testa del grano (González y cols., 1984; Bonet y cols., 2005).

3.8.4 Adultos

Las hembras, de mayor tamaño que los machos, pueden diferenciarse fácilmente por la presencia de cuatro manchas claras en el pronoto, que contrastan con el color oscuro y brillante del cuerpo. Tienen alas bien desarrolladas y su cuerpo es ovalado con su cabeza libre. Los ojos son bien desarrollados y con 11 segmentos en sus antenas. Las patas posteriores son más gruesas que las anteriores (Bonet y cols., 2005; Ascencio-Alvarado, 2012).



Figura 5. Ciclo de vida de *Zabrotes subfasciatus* (CABI, 2019).

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

El lugar de donde sale el adulto da la apariencia de una ventana circular en la superficie de la semilla (Rees, 2018). Los adultos emergentes no requieren alimentarse antes ni después del apareamiento, ya que durante su desarrollo larval adquieren todos los nutrientes necesarios para completar su ciclo biológico. Son altamente activos, capaces de correr y volar rápidamente, y con frecuencia se les observa desplazándose sobre la superficie de las semillas infestadas.

3.9 Condiciones de infección

Su ciclo biológico tiene una duración de 24 a 25 días, bajo condiciones de 32 °C y 70% de humedad relativa (Dobie y cols., 1991). Sin embargo, otros autores indican que es de más de 30 días desde huevo a adulto (Golob y Kilminster, 1982; Credland y Dendy, 1992; Barbosa y cols., 1999). La temperatura máxima para desarrollarse es de 37 a 38 °C y una mínima ligeramente por debajo de los 20 °C (Dobie y cols., 1991). Los adultos son de vida corta. Diversos autores han determinado la vida media de los adultos. Por ejemplo, Dell'Orto y Arias-Velásquez (1985) indicaron que el insecto adulto de *Z. subfasciatus* vive alrededor de 10 a 12 días; por su parte, Barbosa y cols. (1999) argumentan que alrededor de los 36 días.

3.10 Alimentación y daños

Es la plaga más importante del frijol común almacenado y el frijol lima (*P. lunatus*) (Dobie y cols., 1991). También puede alimentarse de otros granos de leguminosas, tal es el caso del caupí, arvejas, lentejas y soya (Dell'Orto y Arias-Velásquez, 1985; Rees, 2018). El daño que provoca esta especie insectil es debido a la invasión y alimentación de las larvas en el interior de los granos, produciendo pérdida de peso, disminución del valor nutritivo y pérdida en la higiene del producto, por la presencia de excrementos, huevos e insectos. Además, el poder germinativo de las semillas puede ser reducido o totalmente perdido (Barbosa y cols., 1999).

3.11 Control Cultural

Un método tradicional, empleado para el control de la población de *Z. subfasciatus*, es almacenar los granos de frijol dentro de su propia vaina (Arnal y Ramos, 2006; Del Obregón y Gómez-Gutiérrez, 2023). Esto se debe a que las hembras solo pueden ovipositar por lo general en la semilla desnuda y muy difícilmente en las vainas, a menos que estas se encuentren dehiscentes (Pimbert y Pierre, 1983).

En muchos lugares se emplea la mezcla de plantas locales con el grano almacenado. La información acerca de qué plantas se deben utilizar para el control de plagas y qué partes de la misma deben mezclarse con el grano se transmiten de generación en generación en las zonas rurales (Carrera-Rodríguez y cols., 2009). Las sustancias derivadas de plantas se han empleado en el control de plagas desde tiempos antiguos. Sin embargo, su utilización se vio reducida por la aparición de los insecticidas químicos, limitándose su uso a las zonas rurales (Rodríguez Hernández y López Pérez, 2001).

En países en vías de desarrollo es común el empleo de productos de origen vegetal mezclados con el frijol almacenado para protegerlo durante el almacenamiento. Entre los productos que se han empleado se encuentran las hojas de neem (*Azadirachta indica*), hojas de *Ocimum canum*, frutos de *Capsicum frutescens* y frutos de *Piper nigrum* (Madueke-Onu y cols., 2015; Perales-Aguilar y cols., 2020; Okafor y cols., 2024). Otro método es el uso de aceites vegetales, generalmente de origen local. Entre los aceites vegetales que se ha visto que poseen una efectividad se encuentran las semillas de *Anthonomus grandis*. Sin embargo, las desventajas en el uso de aceites es que producen un aspecto rancio y pegajoso en los granos, lo que podría reducir la aceptación en el mercado (Álvarez Serrano y cols., 2021).

El empleo de polvos minerales como método de control cultural en insectos de granos almacenados, incluyendo a *Z. subfasciatus*, ha sido ampliamente usado (Lopez-Monzon y cols., 2016). La mezcla de arena o ceniza con los granos es un método alternativo en el control de insectos. La arena o las cenizas dañan la cutícula del insecto debido a que la raspan, haciendo que pierda humedad. Si el grano se encuentra seco, no habrá la suficiente humedad para que el insecto pueda reponer lo que perdió, por lo que morirá por desecación (Kalpna y cols., 2022); la ceniza produce una barrera física para los gorgojos.

La mezcla de cal con los granos almacenados es una práctica común en el noroeste de México.

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Permuy-Abeleira y cols. (2008) citan que los campesinos de la región, antes de las cosechas, limpian el área de almacenamiento, eliminando la basura que se pueda encontrar, además de enjabonar el área; posteriormente, cuando se cosecha el grano, se mezcla con la cal para prevenir el ataque de los insectos.

También se ha documentado el uso de extractos de ajo (*Allium sativum*) como repelente e insecticida natural contra *Zabrotes subfasciatus* en frijol almacenado. Estudios desarrollados en El Salvador han demostrado que extractos acuosos e hidroalcohólicos de ajo, aplicados en concentraciones entre el 5% y 20%, logran efectos significativos tanto en la mortalidad de adultos como en la reducción de infestación, sin comprometer la calidad del grano (Rámos-Archila y Santacruz-Jiménez, 2024).

Otro método empleado es exponer a los granos al sol. Los insectos abandonan el grano que es expuesto a los rayos solares, debido a las altas temperaturas (superiores a 40–44 °C). Sin embargo, el asoleado no siempre mata a los huevecillos y larvas que permanecen en el interior del grano (Carrera-Rodríguez y cols., 2009). Este método solo protege a las capas superiores del grano, por lo cual solo puede dañar a los insectos adultos que se encuentran en la superficie o a las larvas que se encuentran en libre movimiento (Cuevas, 2006).

3.12 Control fitogenético

Se han empleado una gran variedad de proteínas que se encuentran almacenadas en las semillas de plantas silvestres de *P. vulgaris* (arcelina e inhibidores de α-amilasas), para el control de *Z. subfasciatus* en frijol almacenado (Goossens y cols., 2000). A pesar de que las semillas del frijol posean proteínas de defensa tales como inhibidores enzimáticos y metabolitos secundarios (alcaloides, saponinas), estas pueden ser atacadas. Esto se debe a que los insectos coevolucionan con sus fuentes alimenticias y, en el curso de la evolución, surgen nuevas razas de insectos que les permiten defenderse de los químicos naturales de las semillas (Rodríguez-Sifuentes y cols., 2020).

3.13 Control físico-mecánico

En las áreas tropicales de algunos países de Centroamérica, así como también en México, el almacenaje hermético de granos para consumo humano es comúnmente empleado; bajo estas condiciones, los insectos sufren una situación estresante debido a la reducción de oxígeno, lo que crea una atmósfera desfavorable para la sobrevivencia de los insectos (Moreno-Martinez y cols., 2000). Los bajos niveles de O_2 y CO_2 causan un estrés metabólico en los insectos, generalmente aumentando la mortalidad y disminuyendo la fecundidad y velocidad de desarrollo (Thompson y Suarez, 2009).

Otro tratamiento físico-mecánico es por medio del calor, que consiste en calentar en un contenedor a una temperatura determinada (50 a 55 °C) por 20 o 30 horas. Este tiempo permite que los materiales de los contenedores se expandan y se ajusten al cambio. Aunque los insectos de almacén mueren en menos de una hora a estas temperaturas, este tiempo tan largo es necesario debido a que el calor debe penetrar donde se podrían encontrar los insectos. Sin embargo, estos métodos de control no suelen ser costo-efectivos, debido a que los contenedores o el equipo para calentar suelen ser costosos.

3.14 Control químico

Es el método más usado en los almacenes de granos; entre los más empleados se encuentran los fumigantes (Perales-Aguilar y cols., 2020). Los fumigantes fosfaminas y el bromuro de metilo son ampliamente utilizados en el control de insectos de granos almacenados (Dierksmeier-Corcuera, 2007). En almacenes altamente tecnificados es común utilizar insecticidas para controlar las plagas que afectan a los productos almacenados. Este enfoque implica la aplicación de sustancias químicas, las cuales pueden adoptar diferentes formas, ya sea en polvo, líquido o como fumigantes.

Los productos en polvo son especialmente empleados en almacenes donde se almacena grano a granel o en sacos, y su aplicación puede ser tanto preventiva como correctiva. Los insecticidas más populares en esta categoría incluyen el malatión, pirimifos-metilo, diclorvos, entre otros. Aunque algunos de estos productos también pueden ser usados en forma de rocío, se prefiere ampliamente el uso de insecticidas piretroides, destacando especial-

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

mente la deltametrina. Además, muchos almacenes recurren a fumigantes, siendo el fosfuro de aluminio uno de los más destacados (García-Lara y cols., 2007).

Vázquez-Zamorano (2014) realizó un estudio para evaluar la efectividad de la permetrina, diazinón y cipermetrina en el control de adultos de gorgojo. Se encontró que la permetrina fue el insecticida más eficaz, con una mortalidad superior al 60 % utilizando la dosis más alta de 500 ppm. En un estudio llevado a cabo en Argentina con el objetivo de evaluar la eficacia del fosfuro de aluminio en el sistema de almacenamiento de silo bolsa, se observó que, a pesar de que hay una cierta pérdida del fumigante, al sellar herméticamente el sistema de almacenamiento, este es capaz de retener la cantidad adecuada de fumigante para eliminar insectos de almacén (Carpaneto y cols., 2016).

El uso de los métodos de control químicos plantea problemas relevantes: riesgo de residuos tóxicos en alimentos, resistencia de insectos, impacto ambiental negativo y restricciones regulatorias crecientes, además del costo asociado a su adquisición, aplicación y equipo especializado (Cevallos-Taxi, 2020). Desde el punto de vista económico, el control químico puede ser más efectivo en escenarios de grandes volúmenes y estructuras de almacenamiento tecnificadas, pero resulta menos accesible y viable en zonas rurales con escasos recursos (Raygoza-Martínez y cols., 2025). Por el contrario, el control cultural ha demostrado ser altamente costo-efectivo en comunidades rurales, especialmente cuando se basa en conocimientos tradicionales y recursos locales. Esta efectividad se debe a que utiliza insumos disponibles en el entorno, requiere poca inversión inicial, no depende de productos comerciales externos y puede ser fácilmente adoptado por las familias productoras, al reducir los riesgos para la salud humana y el ambiente.

4 Conclusiones

La amplia distribución geográfica de *Zabrotes subfasciatus* y su capacidad para infestar diversas leguminosas resaltan la necesidad de investigación continua y la implementación de prácticas de monitoreo y control adaptadas a distintos contextos ambientales y culturales. El enfoque de manejo integrado, que combina métodos culturales, físico-mecánicos, químicos y fitogenéticos, representa una estrategia eficaz y sostenible para el control de esta plaga, minimizando la dependencia de insecticidas químicos y sus riesgos asociados.

No obstante, persisten desafíos como la limitada adopción de prácticas sostenibles, la falta de tecnologías accesibles y la escasa infraestructura de almacenamiento. Por esta razón, se recomienda profundizar la investigación en el desarrollo de variedades resistentes, como medida clave para garantizar la disponibilidad de proteínas y contribuir a la seguridad alimentaria. Al igual, impulsar el desarrollo de nuevas alternativas de control biológico y la innovación en tecnologías de manejo en postcosecha, incorporando enfoques participativos que respondan a las necesidades de los pequeños productores.

También es crucial que las políticas públicas agrícolas integren el manejo postcosecha y que fortalezcan los programas de asistencia técnica con un enfoque en la promoción de prácticas sostenibles como parte de las estrategias de desarrollo rural y seguridad alimentaria. Esto implica promover programas de capacitación, incentivos para prácticas agroecológicas y mejoras en los sistemas de extensión.

Declaración de uso de inteligencia artificial

Los autores DECLARAN que, durante la preparación del artículo titulado «Manejo integrado de *Zabrotes subfasciatus* en el frijol común (*Phaseolus vulgaris*), desafíos y estrategias de control para la seguridad alimentaria», no se utilizaron herramientas de inteligencia artificial generativa ni sistemas automatizados de asistencia para la redacción, análisis, interpretación de datos, generación de contenido, traducción o edición del manuscrito.

Los autores asumen plena responsabilidad por el contenido, la originalidad, la integridad y la versión final del artículo.

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Contribución de los autores

L.D.J.I.: Conceptualización, Curación de datos, Investigación, Supervisión, Escritura – revisión y edición. **L.F.C.D.:** Investigación, Curación de datos, Metodología, Escritura – borrador original. **S.A.J.I.:** Conceptualización, Análisis formal, Validación, Escritura – borrador original.

Referencias

Agrafioti, P., Athanassiou, C. G., y Nayak, M. K. (2019). Detection of phosphine resistance in major stored-product insects in greece and evaluation of a field resistance test kit. *Journal of Stored Products Research*, *82*, 40–47. Online: https://doi.org/10.1016/j.jspr.2019.02.004

Álvarez Serrano, A., Milan-Leyva, E., y Matos-Castillo, Y. (2021). Estudio del efecto de aceites vegetales en el control del gorgojo (*Callosobruchus maculatus* f) en la conservación de granos de frijol caupí. *Opuntia Brava*, *13*(3), 77–86. Online: https://shortlink.uk/1wIsu

Arnal, E. A., y Ramos, F. A. (2006). *Guía práctica sobre alternativas de control de insectos-plaga en los cultivos de caraota y frijol* (Inf. Téc. n.º 12). Publicación Especial (INIA). Online: https://shortlink.uk/1rhwg

Ascencio-Alvarado, J. I. (2012). *Evaluación de la actividad insecticida y repelente del extracto obtenido a partir de la semilla de Annona diversifolia (anona) sobre el Zabrotes subfasciatus (gorgojo común del frijol)* (Bachelor's thesis, Universidad de El Salvador). Online: https://shortlink.uk/1wIsx

Barbosa, F. R., Yokoyama, M., Arraes-Pereira, P. A., y Pfeilsticker-Zimmermann, F. J. (1999). Efeito da proteína arcelina na biologia de *Zabrotes subfasciatus* (Boheman 1833), em feijoeiro. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, *34*(10), 1805–1810. Online: https://shortlink.uk/1wIsB2

Bitocchi, E., Rau, D., Bellucci, E., Rodriguez, M., Murgia, M. L., Gioia, T., … Papa, R. (2017). Beans (*Phaseolus* ssp.) as a model for understanding crop evolution. *Frontiers in Plant Science*, *8*, 722. Online: https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00722

Bonet, A., Morales, C. O., y Rojas, C. V. (2005). El control biológico con parasitoides: una alternativa para limitar a los gorgojos en frijol almacenado. *Fitosanidad*, *9*(2), 35–42.

CABI. (2019). *Zabrotes subfasciatus (Mexican bean weevil). CABI Compendium.* Online Publication. Online: https://doi.org/10.1079/cabicompendium.57289

Cárdenas-Morales, M., Lavastida-Pérez, M., Valdés-Herrera, R., Pozo-Velazquez, E., y Rodríguez-Rojas, R. (2019). Incremento poblacional de *Zabrotes subfasciatus* en cultivares de frijol común. *Centro Agrícola*, *46*(2), 38–45. Online: https://shortlink.uk/1wIsH

Carpaneto, B., Bartosik, R., Cardoso, L., y Manetti, P. (2016). Pest control treatments with phosphine and controlled atmospheres in silo bags with different airtightness conditions. *Journal of Stored Products Research*, *69*, 143–151. Online: https://doi.org/10.1016/j.jspr.2016.07.007

Carrera-Rodríguez, M., Martínez-González, G. M., Navarrete-Bolaños, J. L., Botello-Alverez, J. E., Rico-Martínez, R., y Jiménez-Islas, H. (2009). Estudio numérico del efecto de la temperatura ambiental en la convección natural bidimensional en el almacenamiento de granos en silos cilíndricos. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, *8*(1), 77–91. Online: https://shortlink.uk/1wIsM

Cevallos-Taxi, S. F. (2020). *Evaluación del efecto de ozono (o_3) en el control de gorgojo Pagiocerus frontalis (f.), en granos almacenados de maíz suave (Zea mays l.) en la provincia Cotopaxi, campus experimental Salache, proyecto granos andinos 2020* (Bachelor's thesis, Universidad Técnica de Cotopaxi). Online: https://shortlink.uk/1wIsP

Credland, P. F., y Dendy, J. (1992). Comparison of seed consumption and the practical use of insect weight in determining effects of host seed on the Mexican bean weevil, *Zabrotes subfasciatus* (Boh.). *Journal of Stored Products Research*, *28*(4), 225–234. Online: https://doi.org/10.1016/0022-474x(92)90001-7

Cuevas, M. I. (2006). Insecticidas alternativos para el control de plagas en granos almacenados. *Inventio*, *2*(3), 55–60. Online: https://shortlink.uk/1wIsV

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Dell'Orto, T. H., y Arias-Velásquez, C. J. (1985). *Insectos que dañan granos y productos almacenados* (Inf. Téc. n.º 4). Serie Tecnología Postcosecha (FAO/RLAC). Online: https://shortlink.uk/1wIsZ

Del Obregón, N. C., y Gómez-Gutiérrez, O. J. (2023). Tecnologías y prácticas que utilizan los productores en el manejo poscosecha de maíz y frijol en Estelí, Madriz y Nueva Segovia, Nicaragua. *La Calera*, *23*(41). Online: https://doi.org/10.5377/calera.v23i41.16739

Didinger, C., Foster, M. T., Bunning, M., y Thompson, H. J. (2022). Nutrition and human health benefits of dry beans and other pulses. En M. Siddiq y M. A. Uebersax (Eds.), *Dry beans and pulses* (pp. 481–504). Wiley. Online: https://doi.org/10.1002/9781119776802.ch19

Dierksmeier-Corcuera, G. (2007). Características y mecanismos de acción de algunos compuestos usados en el combate de plagas de almacén. *Fitosanidad*, *11*(2), 81–84.

Dobie, P., Haines, C. P., Prevett, P. F., y Rees, D. P. (1991). *Insects and arachnids of tropical stored products: their biology and identification*. Natural Resources Institute.

Espinal, J. R., Soto, O. J., Abrego, A. N., Pizarro, I. P., Rodriguez, I. Y., y Rosas-Sotomayor, J. C. (2021). Resistencia de genotipos de frijol común a los daños causados por el gorgojo mexicano *Zabrotes subfasciatus* (Boheman) en el almacenamiento. *CEIBA (Edición Zamorano Investiga)*, 112–121. Online: https://shortlink.uk/1wIt6

FAO. (2022). *FAOSTAT database: Dry Bean Yield.* Online: https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL

García-Lara, S., Espinosa-Carrillo, C., y Bergvinson, D. (2007). *Manual de plagas en granos almacenados y tecnologías alternas para su manejo y control*. México, D.F.: CIMMYT.

Golob, P., y Kilminster, A. (1982). The biology and control of *Zabrotes subfasciatus* (Boheman) (Coleoptera: Bruchidae) infesting red kidney beans. *Journal of Stored Products Research*, *18*(3), 95–101. Online: https://doi.org/10.1016/0022-474x(82)90008-x

González, M., Roche, R., y Simanca, M. E. (1984). Ciclo de vida de *Zabrotes subfasciatus* (Coleoptera: Bruchidae), plaga de granos almacenados. *Ciencias de la Agricultura*(21). Online: https://shortlink.uk/1wItb

Goossens, A., Quintero, C., Dillen, W., Rycke, R. d., Flower Valor, J., Clercq, J. d., … Angenon, G. (2000). Analysis of bruchid resistance in the wild common bean accession G02771: no evidence for insecticidal activity of arcelin 5. *Journal of Experimental Botany*, *51*(348), 1229–1236. Online: https://doi.org/10.1093/jexbot/51.348.1229

Gourgouta, M., Rumbos, C. I., y Athanassiou, C. G. (2019). Residual toxicity of a commercial cypermethrin formulation on grains against four major storage beetles. *Journal of Stored Products Research*, *83*, 103–109. Online: https://doi.org/10.1016/j.jspr.2019.05.001

Hernández-Ochandía, D., Rodríguez-Hernández, M. G., Miranda-Cabrera, I., Moreno-León, E., Castro-Lizazo, I., Delgado-Oramas, B. P., y Holgado, R. (2018). Reproducción y efecto nocivo de *Meloidogyne incognita* (Kofoid y White) Chitwood en *Phaseolus vulgaris* L. 'cuba-cueto-25-9'. *Revista de Protección Vegetal*, *33*(2). Online: https://shortlink.uk/1wIth

IICA / Proyecto Red SICTA. (2013). *Estudio de las cadenas de valor maíz blanco y frijol en Centroamérica* (Inf. Téc. n.º 115). Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. Online: https://shortlink.uk/1wItn

Johnson, A. (2019). *Zabrotes subfasciatus (Mexican bean weevil).* CABI Compendium. Online: https://doi.org/10.1079/cabicompendium.57289

Kalpna, Hajam, Y. A., y Kumar, R. (2022). Management of stored grain pest with special reference to *Callosobruchus maculatus*, a major pest of cowpea: A review. *Heliyon*, *8*(1), e08703. Online: https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e08703

Kaplan, L. (1981). What is the origin of the common bean? *Economic Botany*, *35*(2), 240–254. Online: https://doi.org/10.1007/bf02858692

Kaplan, L. (2003). Taxonomy, Distribution, and Ecology of the Genus *Phaseolus* (Leguminosae–Papilionoideae) in North America, Mexico, and Central America. *Economic Botany*, *57*(3), 421. Online: https://shortlink.uk/1wItr

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Katungi, E., Farrow, A., Chianu, J., y Beebe, S. (2009). *Common bean in Eastern and Southern Africa: A situation and outlook analysis* (Inf. Téc.). CIAT. Online: https://shortlink.uk/1wItw

Lopez-Monzon, C. E., Tobar-Tomas, W. V., y Ventura-Gomez, A. G. (2016). Controles alternativos para el gorgojo del frijol (*Acanthoscelides obtectus* Say) en granos almacenados a partir de materiales naturales y minerales. *Ciencia, Tecnología y Salud*, *3*(2), 149–156. Online: https://doi.org/10.36829/63CTS.v3i2.196

Madueke-Onu, F., Ogu, E., y Ikehi, M. (2015). Use of neem and garlic dried plant powders for controlling. *Egyptian Journal of Biological Pest Control*, *25*(2), 507–512.

Mamo, T., Singh, A., Singh, A., Mahama, A. A., y Suza, W. (2023). Common bean breeding. En *Crop improvement*. Iowa State University Digital Press. Online: https://shortlink.uk/1rhxk

Morales-Santos, M. E., Peña Valdivia, C. B., García-Esteva, A., Aguilar-Benítez, G., y Kohashi-Shibata, J. (2017). Características físicas y de germinación en semillas y plántulas de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) silvestre, domesticado y su progenie. *Agrociencia*, *51*(1), 43–62. Online: https://shortlink.uk/1rhxn

Moreno-Martinez, E., Jiménez, S., y Vázquez, M. E. (2000). Effect of *Sitophilus zeamays* and *Aspergillus chevalieri* on the oxygen level in maize stored hermetically. *Journal of Stored Products Research*, *36*(1), 25–36. Online: https://doi.org/10.1016/s0022-474x(99)00023-5

Mukankusi, C., Raatz, B., Nkalubo, S., Berhanu, F., Binagwa, P., Kilango, M., … Beebe, S. (2019). Genomics, genetics and breeding of common bean in Africa: A review of tropical legume project. *Plant Breeding*, *138*(4), 401–414. Online: https://doi.org/10.1111/pbr.12573

Myers, J. R., y Kmiecik, K. (2017). Common bean: Economic importance and relevance to biological science research. En J. R. Myers y K. Ken (Eds.), *Compendium of plant genomes* (pp. 1–20). Springer International Publishing. Online: https://doi.org/10.1007/978-3-319-63526-2_1

Nápoles, J. R. (2018). *Revisión del género Zabrotes para México (Coleoptera: Bruchidae)* (Master's thesis, Colegio de Postgraduados). Online: https://shortlink.uk/1rhxp

Nasar, S., Shaheen, H., Murtaza, G., Tinghong, T., Arfan, M., y Idrees, M. (2023). Socioeconomic evaluation of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivation in providing sustainable livelihood to the mountain populations of Kashmir Himalayas. *Plants*, *12*(1). Online: https://doi.org/10.3390/plants12010213

Okafor, K. P., Akunne, C. E., Nwaoke, A. J., Nlemchi, C. J., Okeke, T. E., Chidi, C. A., … Offor, V. O. (2024). Evaluation of insecticidal potentials of chilli pepper (*Capsicum frutescens* L.) and guinea pepper (*Xylopia aethiopica* Dun. A. Rich.) in the control of bean weevil (*Callosobruchus maculatus* L. Fabricus). *Multidiscience: Journal of Multidisciplinary Science*, *1*(2), 51–66. Online: https://doi.org/10.59631/multidiscience.v1i2.202

Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., … Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ (Clinical Research Ed.)*, *372*, n71. Online: https://doi.org/10.1136/bmj.n71

Perales-Aguilar, L., Chávez-Servia, J. L., Perales-Aguilar, L., Tafoya, F., y Perales-Segovia, C. (2020). Manejo del gorgojo de frijol almacenado, con extractos de plantas asociadas al cultivo. *Revista Mexicana de Agroecosistemas*, *7*(2), 76–84.

Permuy-Abeleira, N., Chaveco-Pérez, O., González-Ferrer, E., J. y García-Sánchez, y Hidalgo-Figueroa, N. (2008). Pérdidas de grano de frijol común en un sistema de almacenamiento tradicional. *Agricultura Técnica en México*, *34*(1), 91–100.

Pimbert, M. P., y Pierre, D. (1983). Ecophysiological aspects of bruchid reproduction. I. The influence of pod maturity and seeds of *Phaseolus vulgaris* and the influence of insemination on the reproductive activity of *Zabrotes subfasciatus*. *Ecological Entomology*, *8*(1), 87–94. Online: https://shortlink.uk/1rhxu

Ramírez Cariño, R. N., Romero Nápoles, J., Vera Graziano, J., Equihua Martínez, A., Bautista Martínez, N., Hernández Morales, J., y Aragón García, A. (2017). Demografía de brúquidos (Coleoptera: Bruchidae) asociados con *Vigna*

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

unguiculata (L.) Walp (Fabaceae). *Acta Zoológica Mexicana*, *33*(1), 9–17.

Rámos-Archila, N. E., y Santacruz-Jiménez, S. F. (2024). *Evaluación de tres diluciones de un extracto de Allium sativum (ajo) y su posible uso como insecticida natural contra el Zabrotes subfasciatus (gorgojo)* (Bachelor's thesis). Universidad de El Salvador.

Raygoza-Martínez, A. P., Rodríguez-Herrera, S. A., Cervantes-Ortiz, F., García-Rodríguez, J. G., Rodríguez-Mercado, D., y Mendoza Elos, M. (2025). Bioinsecticidas para el control de *Zabrotes subfasciatus* Boheman y la calidad de semilla en frijol. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, *16*(1). Online: https://doi.org/10.29312/remexca.v16i1.3086

Rees, D. P. (2018). Coleoptera. En *Integrated management of insects in stored products* (pp. 1–39). CRC Press. Online: https://doi.org/10.1201/9780203750612-1

Refaay, D. A., El-Marzoki, E. M., Abdel-Hamid, M. I., y Haroun, S. A. (2021). Effect of foliar application with *Chlorella vulgaris*, *Tetradesmus dimorphus*, and *Arthrospira platensis* as biostimulants for common bean. *Journal of Applied Phycology*, *33*(6), 3807–3815. Online: https://doi.org/10.1007/s10811-021-02584-z

Rodríguez-Sifuentes, L., Marszalek, J. E., Chuck-Hernández, C., y Serna-Saldívar, S. O. (2020). Legumes protease inhibitors as biopesticides and their defense mechanisms against biotic factors. *International Journal of Molecular Sciences*, *21*(9). Online: https://doi.org/10.3390/ijms21093322

Rodríguez Hernández, C., y López Pérez, E. (2001). Actividad insecticida e insectistática de la chilca (*Senecio salignus*) sobre *Zabrotes subfasciatus*. *Manejo Integrado de Plagas*, *62*, 45–52. Online: https://shortlink.uk/1rhxz

Singh, S. P. (2013). *Common bean improvement in the twenty-first century* (Vol. 7). Springer Netherlands.

Souza, S. M., Uchôa, A. F., Silva, J. R., Samuels, R. I., Oliveira, A. E. A., Oliveira, E. M., … Silva, C. P. (2010). The fate of vicilins, 7S storage globulins, in larvae and adult *Callosobruchus maculatus* (Coleoptera: Chrysomelidae: Bruchinae). *Journal of Insect Physiology*, *56*(9), 1130–1138. Online: https://doi.org/10.1016/j.jinsphys.2010.03.009

Thompson, S. N., y Suarez, R. K. (Eds.). (2009). *Encyclopedia of insects*. London, UK: Academic Press.

Tigist, S. G., Raatz, B., Assefa, A., Melis, R., Sibiya, J., Keneni, G., … Tsegaye, D. (2021). Introgression of bruchid (*Zabrotes subfasciatus*) resistance into small red common bean (*Phaseolus vulgaris*) background and validation of the BRU_00261 (snpPV0007) resistance marker. *Plant Breeding*, *140*(6), 1081–1089. Online: https://doi.org/10.1111/pbr.12969

Torres-Treminio, J. A., y Mendoza-Montoya, J. (2002). *Efecto de la fertilización mineral, orgánica y control de malezas sobre crecimiento y rendimiento en frijol común (Phaseolus vulgaris L.) en condiciones de ladera, establecido bajo dos sistemas de labranza, Ticuantepe, postrera dos mil* (Bachelor's thesis, Universidad Nacional Agraria, Managua, Nicaragua). Online: https://shortlink.uk/1wItV

Vázquez-Zamorano, R. L. (2014). *Evaluación de tres insecticidas para el control del gorgojo del maíz Sitophilus zeamays Motschulsky, bajo condiciones de laboratorio* (Bachelor's thesis, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Saltillo, Coahuila, México). Online: https://shortlink.uk/1wItZ

Wilker, J., Humphries, S., Rosas-Sotomayor, J. C., Cerna, M. G., Torkamaneh, D., Edwards, M., … Pauls, K. P. (2020). Genetic diversity, nitrogen fixation, and water use efficiency in a panel of Honduran common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) landraces and modern genotypes. *Plants*, *9*(9). Online: https://doi.org/10.3390/plants9091238

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

La Granja:
Revista de
Ciencias de la Vida
pISSN:1390-3799; eISSN:1390-8596
https://doi.org/10.17163/lgr.n44.2026.09

Artículo científico / Scientific paper

Conservación

CC BY NC SA

Factores de cobertura y uso del suelo asociados al riesgo de degradación de la vegetación en la Reserva Ecológica Arenillas

Land cover and land use factors associated with the risk of vegetation degradation in the Arenillas Ecological Reserve

Jaime Enrique Maza Maza*, Hugo Enrique Añazco Loaiza, Darwin Amable Poma Luna y Alex Dumany Luna Florin

*Universidad Técnica de Machala. Machala, Ecuador. [*https://ror.org/036zk8k10*]*

*Autor para correspondencia: jemaza@utmachala.edu.ec

Manuscrito recibido el 29 de marzo de 2023. Aceptado, tras revisión el 7 de septiembre de 2023. Publicado el 1 de septiembre de 2026.

Resumen

Las áreas protegidas constituyen zonas prioritarias para conservar la biodiversidad natural y cultural, permitiendo el aseguramiento de los bienes y servicios para la sociedad. El presente estudio evalúa los factores de cobertura y uso de suelo asociados a los riesgos del estado de la vegetación en la Reserva Ecológica Arenillas (REAR) (sur de Ecuador), usando como indicador el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI en inglés) y variables antrópicas a las que está expuesta la vegetación. El proceso de análisis se efectuó con el uso de imágenes satelitales SENTINEL-B2 con base en los cuatro ecosistemas de la Reserva y los seis tipos de suelo encontrados. A través de regresión lineal múltiple se estableció un modelo de probabilidad de riesgo en relación a las variables de amenaza de zonas: agrícolas, acuícolas, pecuarias, de población y vías. Los resultados revelaron un mayor valor de NDVI en el Herbazal Inundable y Manglar, seguidos del Bosque Arbustal deciduo y Bosque deciduo. Así mismo, 18.7% de cobertura vegetal se encuentra en alto riesgo en toda la REAR, situándose la mayor perturbación y amenaza en los bordes noroeste y noreste del Bosque Arbustal deciduo y bordes suroeste del Bosque deciduo, y bajo el mismo patrón se presentan en las entradas de las Vías principal y secundarias. En cambio, para el ecosistema Manglar las zonas de mayor variabilidad se ubican en aquellas que limitan con la actividad acuícola camaronera. Es importante indicar que, si no se protegen las áreas adyacentes a la REAR, el poco bosque remanente desaparecerá, limitando la conectividad con otros bosques naturales.

Palabras clave: NDVI, factores de riesgo, bosque seco, Reserva Ecológica Arenillas, uso de suelos.

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Abstract

Protected areas are priority zones for the conservation of natural and cultural biodiversity, allowing the assurance of goods and services for society. This study evaluates land cover and land adoption factors associated with vegetation criteria risks in the Arenillas Ecological Reserve (REAR) (southern Ecuador), using the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and anthropic variables to which the vegetation is elucidated as indicators. The analysis procedure was applied using SENTINEL-B2 satellite images based on the Reserve's four ecosystems and the six soil types found. Through multiple linear regression, a risk probability model was determined in relation to the threat variables of agricultural, aquaculture, livestock, population and road zones. The results revealed a higher NDVI value in Flooded Grassland and Mangrove, followed by the Deciduous Shrubland and Deciduous Forest. Correspondingly, 18.7% of vegetation cover is at high risk throughout the REAR, with the greatest disturbance and threat on the northwestern and northeastern edges of the deciduous shrub forest and southwestern edges of the deciduous forest, and the identical pattern is present at the entrances to the main and secondary roads. On the other hand, for the Mangrove ecosystem, the areas with the greatest variability are those bordering the shrimp aquaculture activity. It is essential to note that if the areas adjacent to the REAR are not protected, the little remaining forest will disappear, limiting connectivity with other natural forests.

Keywords: NDVI, risk factors, dry forest, Arenillas Ecological Reserve, land use.

Forma sugerida de citar: Maza, J., Añazco, H., Poma, D. y Luna, A. (2026). Factores de cobertura y uso del suelo asociados al riesgo de degradación de la vegetación en la Reserva Ecológica Arenillas. *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida.* Vol. 44(2):154-170. https://doi.org/10.17163/lgr.n44.2026.09.

Orcid IDs:

Jaime Enrique Maza Maza: https://orcid.org/0000-0002-4845-5165
Hugo Enrique Añazco Loaiza: https://orcid.org/0000-0001-6090-7155
Darwin Amable Poma Luna: https://orcid.org/0000-0002-6761-7430
Alex Dumany Luna Florin: https://orcid.org/0000-0003-4975-405X

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

1 Introducción

En la actualidad las áreas protegidas (AP) constituyen zonas prioritarias para la conservación del ambiente, permitiendo el buen funcionamiento y aseguramiento de los recursos bióticos y abióticos, al igual que el sostenimiento de los bienes y servicios que posee cada ecosistema (Union Internacional para la Conservacion de la Naturaleza IUCN, 2005). A nivel mundial las AP comprenden una gran extensión de bosques secos tropicales. Estudios recientes realizados por la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación FAO (2020) señalan que, de los 218 millones de hectáreas de bosques existentes, 26.7% de estos bosques se encuentran protegidos. Sin embargo, a diferencia de los bosques húmedos, la atención de los gobiernos a los bosques secos ha sido escasa, sintiéndose la ausencia y el mayor riesgo de impacto por parte de los seres humanos (Ramírez y cols., 2018); problema que nace debido a la impericia y falta de información que ha comprometido los principios de conservación (Carey y cols., 2000), y que consecuentemente son preocupantes, por el nivel de amenaza y vulnerabilidad que estos ecosistemas presentan (Wright y Muller-Landau, 2006).

En el caso de Ecuador, el bosque seco tropical, localizado en las costas del Pacífico pertenece a uno de los 35 *hotspot* o puntos calientes de biodiversidad (Mittermeier y cols., 2011), denominado Tumbes–Chocó-Magdalena. Su importancia ecológica ha sido el factor condicionante para la regulación y provisión de servicios ecosistémicos que son aprovechados por la sociedad. Sin embargo, por su abundante riqueza natural endémica, los bosques tropicales secos son los más propensos a ser deforestados y degradados, sin tener claro cuáles son los factores que están repercutiendo en el cambio a otros usos de suelo en los ecosistemas. Según Armenteras y Rodríguez (2014), el problema de la deforestación en estas zonas se debe a factores biofísicos y sociales como: el asentamiento de poblados, la fácil accesibilidad por la construcción de vías, la cercanía a cuerpos hídricos, al igual que la inadecuada gestión de tierras y el cambio climático. Sin embargo, estudios realizados por Tapia-Armijos y cols. (2015) en los bosques tropicales del Sur de Ecuador revelaron que el aumento de carreteras en el año 2000 intensificó la accesibilidad de sitios inexplorables, llegando a convertir para el año 2008 alrededor de 46% de bosque natural en coberturas de pasto, agrícolas y otros tipos de actividad antrópica.

Según los datos públicos del Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica del Ecuador (MAAE), existen 21 000 ha de bosque seco deciduo, registrados dentro del Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SNAP), equivalente casi al 50% del total de bosque (41 000 ha) en el país (Riofrío, 2018). Formando parte de este sistema nacional se ubica la Reserva Ecológica Arenillas (REAR), situada en la provincia de El Oro, que desde su creación ha venido tolerando intensas presiones por parte de las comunidades aledañas, quienes han buscado desarrollar sus actividades agropecuarias dentro y alrededor del bosque, al igual que otras amenazas antrópicas como la cacería, extracción de madera, y el establecimiento de actividades acuícolas, siendo causas directas que han impedido la regeneración natural de especies nativas (Ministerio del Ambiente del Ecuador MAE, 2015). Para Ruiz (2018) estos tipos de bosques presentan un alto riesgo, especialmente por las actividades antrópicas que se llevan dentro y en su área de influencia. Por otro lado, las presiones climáticas como el aumento de la temperatura y la disminución de la lluvia es probable que afecten a las comunidades ecológicas de los bosques secos (Maza-Maza y cols., 2021), lo que significa una reducción de los servicios ecosistémicos de provisión de hábitat, importantes para el aseguramiento del suelo y de la biodiversidad (Qian y cols., 2022).

Por la gran importancia que tienen los bosques secos, y por la escasa información científica en la REAR y demás áreas del Litoral Sur del Ecuador, se ha visto necesario, a través de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y de las imágenes satelitales, levantar información de la zona, siendo una herramienta de gran importancia y precisión para la valoración del estado y calidad de la vegetación, como también de los riesgos antrópicos a los que están expuestos los ecosistemas. Además, estas tecnologías brindan la posibilidad de efectuar análisis a nivel continental y en periodos de tiempo específicos (Sudmanns y cols., 2020), permitiendo de esta manera sectorizar de forma oportuna las áreas de mayor vulnerabilidad, evaluar los procesos de transformación de la cobertura y uso del suelo y sus áreas adyacentes (Faruque y cols., 2022), y ayudar a los tomadores de decisiones a establecer

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

medidas de cambio socioeconómicas para un mejor manejo de conservación en los bosques (Baig y cols., 2022).

Por lo expuesto, el presente estudio tiene como objetivo evaluar los factores de coberturas y uso de suelo asociados a los riesgos del estado de la vegetación en la REAR, usando como indicador el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) y diversas variables antrópicas a las que está expuesta. Según Gonzaga-Aguilar (2015) y Mesa-Sierra y cols. (2022), el NDVI es un indicador de biomasa fotosintética activa relacionado a comportamientos de cultivos, estado y salud de la vegetación natural. Se partió de la hipótesis de que el cambio de cobertura vegetal en la reserva se debe a la presión socioeconómica de actividades productivas desarrolladas en su área de influencia. De esta forma, los resultados obtenidos permitirán tener una mayor precisión e interpretación de información de la zona de influencia de la REAR, lo que llevará a tomar decisiones correctas en la propuesta e implementación de políticas públicas y programas de restauración y conservación en cada uno de los ecosistemas del área protegida.

2 Materiales y Métodos

El presente estudio se realizó en la REAR, situada al suroeste del Ecuador, en la cuenca del río Zarumilla de la provincia de El Oro (ver Figura 1). De acuerdo al plan de manejo de la Reserva, esta zona cuenta con un área de 13 170.025 ha (Ministerio del Ambiente del Ecuador MAE, 2015). El clima varía de acuerdo a las zonas, representado por un clima cálido árido en la zona baja, con una precipitación anual de hasta 350 mm, un cálido muy seco, en la zona media, y clima cálido seco en la zona alta, con una precipitación anual que va desde los 500 a 1 000 mm (Instituto de Ecología Aplicada ECOLAP y Ministerio del Ambiente del Ecuador MAE, 2007). El nivel altitudinal es de 0 a 300 metros sobre el nivel del mar (msnm) y la temperatura media es 24 ºC. Es el área protegida de vegetación xerofítica más importante del país con un registro de 111 especies florísticas, en su mayoría nativas y endémicas, sobresaliendo la familia de las Mimosáceas y seguidas de las Cactáceas y Bromeliáceas. En cuanto a la parte faunística su registro está conformado por 159 especies, sobresaliendo el grupo de aves con alrededor de 79 especies (Union Internacional para la Conservacion de la Naturaleza IUCN, 2020). Por su gran extensión también se presentan zonas de vegetación de manglar y herbazal inundable.

2.1 Análisis del estado de la vegetación

Para este análisis se aplicó el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI por sus siglas en inglés), constituido por la combinación de las reflectancias captadas en el rango espectral del rojo al infrarrojo cercano (Gonzaga-Aguilar, 2015), como se explica en la siguiente ecuación:

$$\mathrm{NDVI} = \frac{\mathrm{NIR} - \mathrm{R}}{\mathrm{NIR} + \mathrm{R}} \tag{1}$$

Donde, NIR es la reflectancia corregida atmosféricamente correspondiente al infrarrojo cercano; R es la reflectancia corregida atmosféricamente correspondiente al rojo. Se utilizaron imágenes SENTINEL-2B, correspondientes a los meses de mayor precipitación: enero, febrero, marzo, abril, mayo y junio del 2018; el resto de los meses se descartaron por su diferencia estacional seca y por el alto porcentaje de nubosidad que presentaban las imágenes. El NDVI se calculó en cada escena de imagen con base en las bandas 4 y 8 del satélite. A partir de las diferentes imágenes artificiales disponibles y a través del método de mosaico de calidad, que consiste en enlazar espacialmente un conjunto de datos de imágenes (Eraso y cols., 2022), se generó un compuesto mensual –de los meses enero a junio– y a cada píxel se le asignó el valor máximo de NDVI. Este proceso se desarrolló mediante la adaptación de un script específico (disponible en http://www.gisandbeers.com/RRSS/Engine/Script-GEE-lista-indices-vegetacion.txt) en la plataforma Google Earth Engine (GEE) (ver Figura 2). Esta herramienta se destaca por su capacidad máxima de procesamiento, lo que permite agregar más recursos en paralelo al momento de analizar los datos (Gomes y cols., 2020).

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

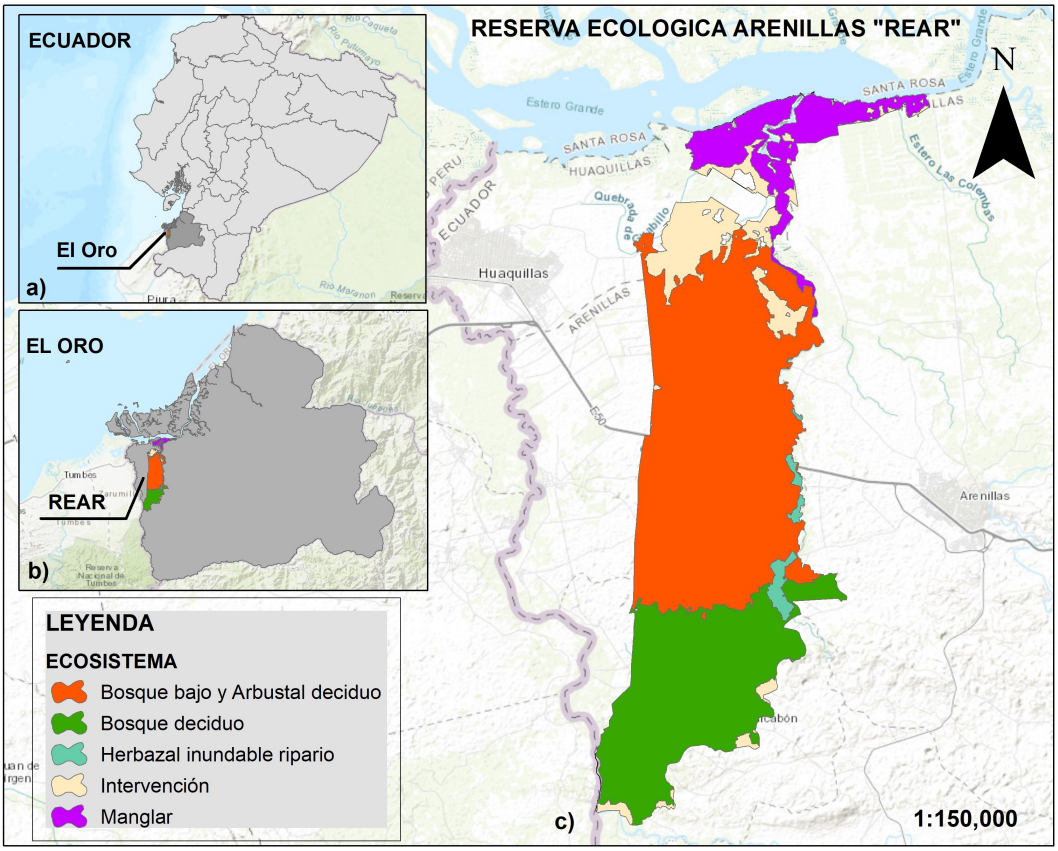


Figura 1. Área y ecosistemas de estudio. a) Provincia de El Oro-Ecuador, b) la REAR en la provincia de El Oro, y c) Ecosistemas de la REAR.

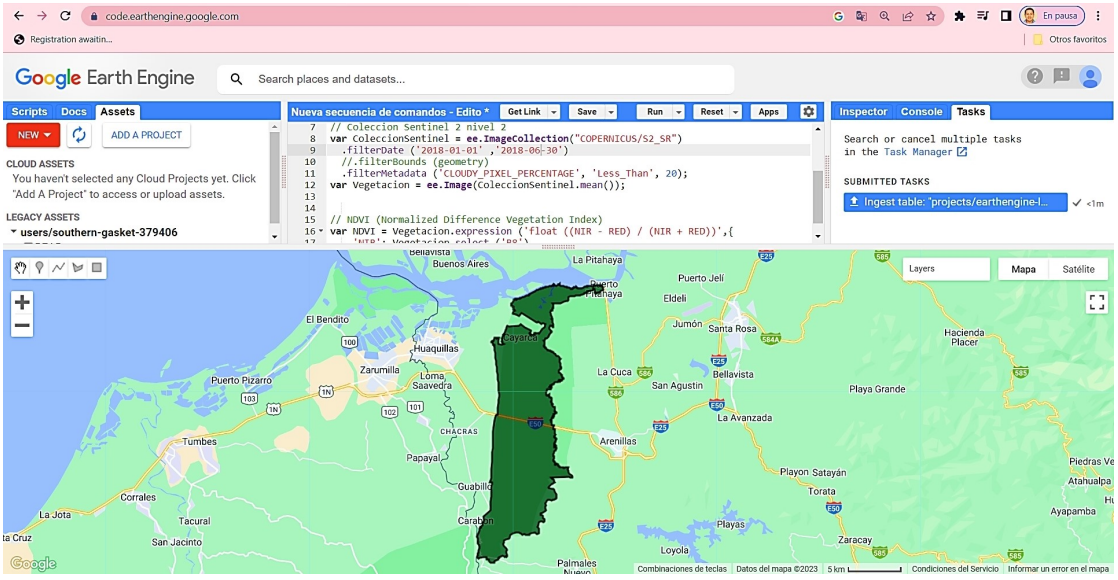


Figura 2. Interfaz de la plataforma de GEE, identificando el área de estudio y procesamiento del NDVI.

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Una vez obtenidos los seis compuestos mensuales del NDVI, se calcularon las estadísticas de la media (valor promedio) y máximo, este último usado para analizar el rango de datos y encontrar el valor más grande por celda a partir de varios ráster, derivando como resultado dos conjuntos de nuevos archivos ráster (media; enero a junio; y máxima; enero a junio). A cada ráster se le efectuó una operación de estadística zonal para los diferentes ecosistemas del área de estudio, creándose cuatro archivos ráster para cada estadística.

Los tipos de ecosistemas definidos corresponden a: (1) Bosque deciduo de tierras bajas de Jama-Zapotillo (Bosque deciduo), (2) Bosque bajo y Arbustal deciduo de Jama-Zapotillo (Bosque Arbustal deciduo), (3) Manglar de Jama-Zapotillo (Manglar), y (4) Herbazal inundable ripario de tierras bajas de Jama-Zapotillo (Herbazal inundable) (Ministerio del Ambiente del Ecuador MAE, 2013).

Finalmente, los archivos creados fueron fusionados mediante la herramienta de mosaico a nuevo ráster, determinando el promedio de NDVI de la media y máxima de cada ecosistema identificado. Este proceso se desarrolló en el software ArcGIS versión 10.2.

2.2 Análisis de factores de riesgo de la vegetación

Según lo establecido en el Plan de Manejo de la REAR (Ministerio del Ambiente del Ecuador MAE, 2015), las principales amenazas que afectan a la conservación del bosque seco son de origen antropogénico: litigios por tenencia de tierra; invasiones del área de la reserva ecológica; extracción de especies forestales; e incremento de las presiones debido a actividades agrícolas y acuícolas. Por lo tanto, bajo este criterio, se estableció un área de influencia o zona *buffer* de 1 km fuera de la reserva, y se consideraron cinco coberturas y usos de suelo como variables de riesgo sobre la vegetación, así: (1) Zona acuícola, (2) Zona agrícola, (3) Zona pecuaria, (4) Población, y (5) Vías de acceso, concordando con lo establecido por Barber y cols. (2014) quienes afirman que los factores más conducentes a la deforestación son: el crecimiento de poblados, la extensión agropecuaria y acuícola, las cercanías a las vías y ríos, y la capacidad del suelo.

La información de población y vías se obtuvo de la plataforma del Sistema Nacional de Información-SNI (Secretaría Nacional de Planificación, 2014). Para las vías se consideraron las categorías: Carretera pavimentada de dos o más vías, Carretera sin pavimentar angosta y Camino de verano; mientras que para las coberturas acuícola, agrícola y pecuaria, se utilizaron las imágenes del Google Earth y, mediante el software QGIS 3.10 se digitalizaron cada una de las zonas, las mismas que fueron: contrastadas con el mapa de coberturas y usos de la tierra del año 2018 del Ministerio del Ambiente del Ecuador (Ministerio del Ambiente del Ecuador MAE, 2018), y fueron reclasificadas en el software ArcGIS 10.2, obteniendo un mapa binario. Consecutivamente, mediante la herramienta de distancia de coste, se realizó con cada una de las variables de coberturas la determinación de la distancia ponderada más corta (De Smith y cols., 2007), obteniendo los ráster de distancias a zonas: acuícolas, agrícolas, pecuarias, población y vías.

2.3 Análisis estadístico

A partir de los compuestos de NDVI mensuales se estimó el promedio del índice para toda la cobertura vegetal de la REAR. Como primera estadística, considerando que los distintos tipos de suelo y sus características no siempre son propicias para producir los nutrientes necesarios para el crecimiento saludable de la vegetación (Moreno y cols., 2018), se utilizó el análisis de varianza (ANOVA de una vía) con el propósito de analizar el efecto de perturbación que podría acontecer la vegetación con los diferentes tipos suelo y ecosistemas (Cantón y cols., 2020). Este modelo desarrollado permite comparar las varianzas entre las medias de diferentes grupos (Liu y Wang, 2021). En este caso explica si el modelo cuadrático es significativo entre las variables independientes de ecosistemas y orden de suelos en función a la variable dependiente de respuesta del NDVI. La información de suelos fue obtenida de la cartografía geo-pedológica en el Portal del Agro Ecuatoriano (Ministerio de Agricultura y Ganadería del Ecuador MAG, 2016).

Para analizar si más de una variable tiene influencia o está correlacionada con el valor de una tercera variable, se aplicó el modelo de regresión lineal múltiple con el propósito de ajustar modelos lineales, que permitan conocer en cuál de los eco-

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

sistemas de la REAR la vegetación se encuentra en mayor riesgo de perturbación en relación a las variables independientes de amenaza como son distancias a zonas: (1) agrícolas, (2) acuícolas, (3) pecuarias, (4) población, y (5) vías (Cayuela, 2010).

3 Resultados y Discusión

3.1 Estado de la vegetación en los ecosistemas y tipos de suelos de la REAR

De acuerdo con los resultados obtenidos en este análisis, se determinó que dentro de la Reserva Ecológica REAR el NDVI promedio de cada uno de los ecosistemas presentes ((1) Bosque deciduo, (2) Bosque Arbustal deciduo, (3) Manglar, y (4) Herbazal inundable), definidos por el Ministerio del Ambiente del Ecuador MAE (2013) fluctúan en un rango de -0.19568 a 0.85521, donde los valores con un NDVI < 0 corresponden a cubiertas no vegetales y valores cercanos al rango inferior a 0 corresponden a las áreas con mayor presión antrópica, causando degradación en la vegetación natural de los ecosistemas, mientras que los valores cercanos al rango superior manifiestan una cobertura vegetal densa con presiones antrópicas de baja magnitud.

Las investigaciones realizadas en bosques con característica similar a la REAR, como es el bosque protector Cerro Blanco ubicado en el cantón Guayaquil, donde sus valores de NDVI son mayores a 0.50 equivalente a una vegetación densa y bien desarrollada, han permitido demostrar la importancia de sus servicios ecosistémicos y la necesidad de crear medidas de conservación, debido a la amenaza antrópica a su alrededor (Cervantes y cols., 2022). De hecho, la mayoría de la cubierta vegetal dentro de la REAR (ver Figura 3a) es un indicador del eficaz trabajo de control de conservación que realizan sus guardaparques. Este modelo no solo se presenta en esta región, a nivel mundial también se observan tasas menores de deforestación en el interior de las áreas protegidas (Figueroa y Sánchez-Cordero, 2011).

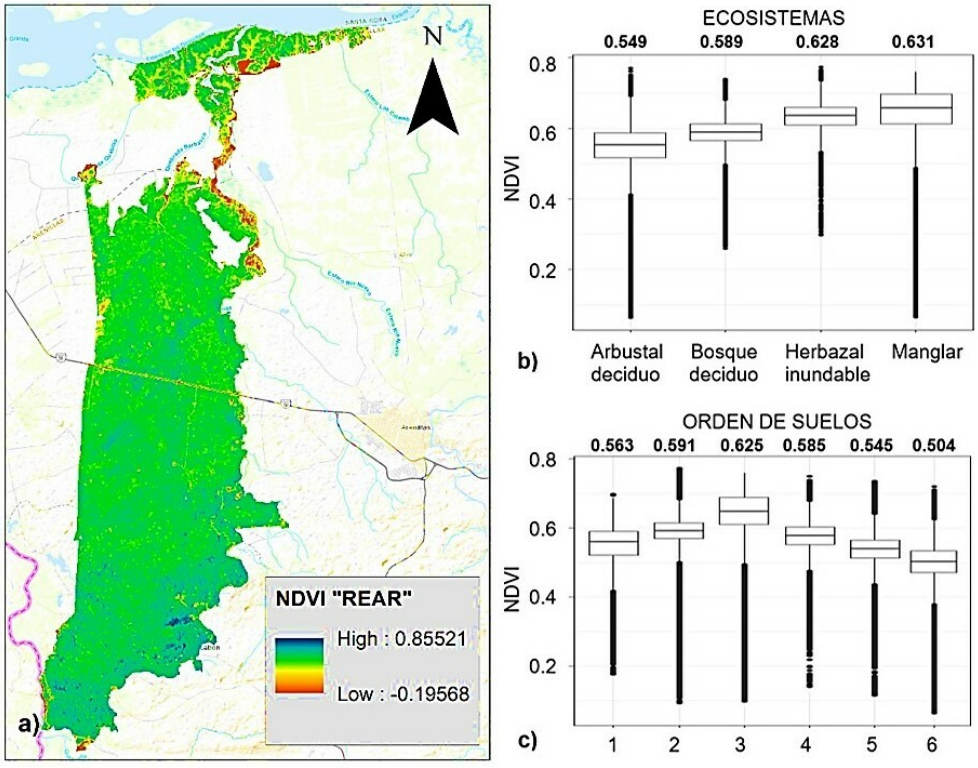


Figura 3. Estado de la vegetación: a) Distribución areal del NDVI de la REAR, b) diagrama de cajas con promedios de NDVI por ecosistemas, y c) diagrama de cajas con promedios de NDVI por orden de suelos.

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

A partir del estudio de la dinámica espacial de la REAR, con el fin de observar el comportamiento de los datos atípicos pertenecientes a los valores de NDVI con las variables de los cuatro tipos de ecosistemas ((1) Bosque deciduo, (2) Bosque Arbustal deciduo, (3) Manglar, y (4) Herbazal inundable), y de los seis órdenes de suelos ((1) Tierras misceláneas, (2) Vertisol, (3) Entisol, (4) Alfisol, (5) Inceptisol y (6) Aridisol) de la REAR se realizaron diagramas de cajas. En las figuras 3b y 3c se compilan dichos gráficos, donde se observó que la mayor parte de datos atípicos (líneas verticales) se encuentran por debajo de la mediana (cuartil 2), es decir, son valores que se encuentran distantes del cuartil 3 y cuartil 1, 1.5 veces superior al rango intercuartílico (Montealegre, 2017). Así mismo, se observó una distribución asimétrica hacia valores altos, entre el factor de respuesta de NDVI con las variables de los cuatro tipos de ecosistemas y una distribución asimétrica del NDVI, hacia valores medios a altos de los seis órdenes de suelos.

En la Figura 3b el tamaño de las cajas revela que el mayor valor de NDVI presentó una mediana superior de 0.631 en el ecosistema Manglar, con un área de 1 239 ha, exceptuando pequeñas áreas situadas en el noreste de los bordes de los parches de bosques, sector colindante con las actividades acuícolas, y donde se registran los valores más bajos de NDVI < 0.1, que significan un mayor nivel de perturbación y débil estado de la vegetación. De acuerdo con Torres y cols. (2014) este fenómeno se produce por la proximidad que presentan ciertos parches con las zonas alteradas, provocando de manera directa un impacto sobre las condiciones ecológicas de la vegetación. Por otro lado, la vegetación con los valores alto de NDVI con medianas superiores a 0.628 se ubican también en el ecosistema Herbazal inundable, deduciendo de esta manera que la superficie de 184 ha comprende una vegetación natural vigorosa de modo que las diferentes amenazas como: la población, la deforestación y establecimientos de actividades agropecuarias (Aldás, 2019), no tienen notable influencia en la zona.

En cuanto a los valores de NDVI del Bosque deciduo y Bosque Arbustal deciduo, el tamaño de las cajas de las medianas fue inferior, correspondiendo a los promedios de 0.589 y 0.549 respectivamente, implicando que la presión antrópica sobre la vegetación natural en estos ecosistemas es muy representativa en ciertos sectores. Por ejemplo, para el Bosque deciduo, con una superficie de 3 597 ha, las áreas con mayor grado de perturbación se ubican en los bordes de los parches de vegetación remanente en el sector suroeste. En cambio, para el ecosistema de mayor extensión (6 773 ha), del Bosque Arbustal deciduo, las áreas de mayor amenaza se concentran en los bordes de los parches de vegetación remanente del sector norte, este y oeste. Esto se manifiesta por el contacto directo con las zonas de actividad agropecuaria y acuícola, así mismo, por los espacios adyacentes a la vía principal y senderos que cubren la zona.

En la Figura 3c, para los tipos de suelos ((1) Tierras misceláneas, (2) Vertisol, (3) Entisol, (4) Alfisol, (5) Inceptisol, y (6) Aridisol) la mediana superior del NDVI fue dominante en el orden Entisol, con un promedio de 0.625, seguido del Vertisol y Alfisol, con valores de 0.591 y 0.585, respectivamente. En cambio, las medianas con valores moderados se vieron representadas en las Tierras misceláneas, con un promedio de 0.563, seguido del Inceptisol, con 0.545, para el tipo de suelo Aridisol su promedio de NDVI fue el más bajo con 0.504. De toda el área de estudio 72% de suelo Entisol se ubicó en el ecosistema Manglar, y de manera específica abarcó 92% de su superficie, seguido de 8% del suelo Vertisol y Tierras misceláneas. Leiva y cols. (2009), en su investigación en Costa Rica, sostienen que los suelos entisoles al estar en una cronosecuencia de cambios fisicoquímicos podrían provocar un estrés hídrico en la planta.

Para el Bosque deciduo los suelos con mayor cobertura fueron: el alfisol con 56% y vertisol con 32%, seguidos por entisol e inceptisol con 9 y 3%. Mientras que, en el Bosque Arbustal deciduo, por su extensión y posición geográfica, la superficie estuvo mayormente abarcada por los suelos inceptisol y alfisol (38 y 28%), respectivamente, seguidos por Aridisol (18%), Vertisol (14%) y 2% entre Entisol y Tierras misceláneas. El Herbazal inundable estaba compuesto por 58% de suelo vertisol y 42% de suelo alfisol. La diversidad de suelos presentes en la Reserva podría deberse a ciertos factores como la pendiente; en el caso de zonas planas, el proceso de acumulación localizada de agua y nutrientes es más efectivo que en suelos de pendientes pronunciadas (Clark, 2002). El clima estacional en zonas de muy poca precipitación y altas temperatu-

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

ras estarían favoreciendo a los aridisoles (Botta y cols., 2019). La probable presencia de rocas volcánicas serían los formadores de vertisoles y entisoles, en cambio, los suelos inceptisol y alfisol son más propicios a paisajes ondulados y de montañas (Hartemink y Bockheim, 2013).

Tabla 1. ANOVA de interacción entre el NDVI con las variables de ecosistemas y orden de suelos

Variables	Grados de libertad	Cuadrados medios	Suma de cuadrados	F-valor	Pr (>F) (*p*-valor)
Ecosistemas	3	869.5	289.83	107 470	<2e-16 ***
Orden de suelos	5	1 313.2	218.86	81 154	<2e-16 ***
Interacción 2 factores	5	78.2	13.04	4 834	<2e-16 ***

Códigos de significancia: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.'.

A través del cálculo de las medias en el ANOVA (ver Tabla 1), se comprobaron diferencias significativas entre el factor de respuesta de NDVI con las variables de ecosistemas y orden de suelos. Se evidenció que el valor de F para las dos variables de estudio fue significativo al nivel de significancia $\alpha = 0.05$, ya que $\Pr > F$ (Probabilidad mayor que el F calculado) es igual a $< 2 \times 10^{-16}$, siendo este último valor menor que 0.05. La variable de interacción de los dos factores presentó el mismo nivel de significancia, determinando de esta manera que tanto el suelo como el ecosistema y las interacciones son altamente significativas; es decir que el ecosistema y el suelo condicionan la respuesta del NDVI, y el efecto de cada uno de ellos depende del otro. En este caso, el suelo es el que más influencia tiene; todos los ecosistemas tienen una respuesta casi parecida con reducidas diferencias en el Herbazal inundable y Manglar, y el que sean más o menos productivos está muy condicionado por el suelo (ver Figura 4), relativamente a los resultados obtenidos por Mesa-Sierra y cols. (2022) donde los valores de NDVI y fertilidad del suelo se distribuyeron de manera uniforme de 0.21 y 0.34, considerada vegetación poco saludable por su localización en regiones de alto índice de impacto antrópico y degradación ecológica.

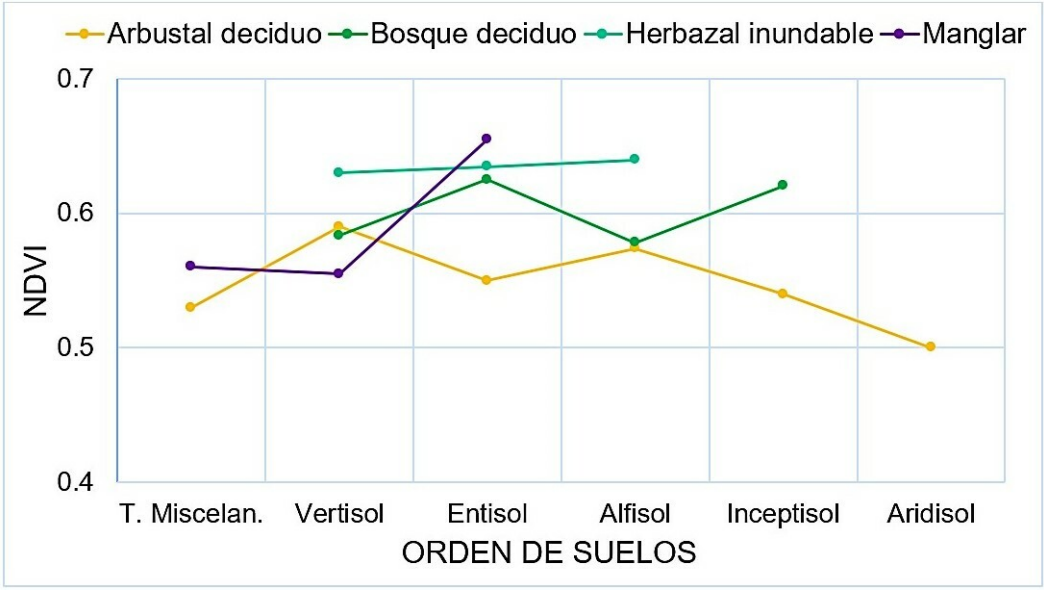


Figura 4. Interacción de las medias del NDVI con los ecosistemas y orden de suelos de la REAR.

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

3.2 Factores y grado de riesgo sobre la vegetación en la REAR

Los datos obtenidos en este análisis permitieron enfatizar el condicionamiento que presentan los diferentes ecosistemas de la REAR con los intercambios y aproximaciones de las diferentes coberturas y uso del suelo situados en el área de influencia, es decir, factores que ponen en riesgo el estado y calidad de la vegetación.

El análisis efectuado reveló que del total de superficie de los cuatro ecosistemas de estudio ((1) Bosque deciduo, (2) Bosque Arbustal deciduo, (3) Manglar, y (4) Herbazal inundable), 18.7% de cobertura vegetal se encuentra en alto riesgo, situándose la mayor perturbación y amenaza en los bordes noroeste y noreste del Bosque Arbustal deciduo y suroeste del Bosque deciduo, bajo el mismo patrón se presentan en las entradas de las Vías principal y secundarias. Las áreas de riesgo de los dos ecosistemas fueron de 2 438 y 950 ha, equivalente a 36 y 26.4% respectivamente. En cambio, para el ecosistema Manglar las zonas de mayor variabilidad se ubican en aquellas que limitan con la actividad acuícola camaronera, con un área de bajo riesgo de 126 ha, correspondiente a 10.2%. El ecosistema que no presentó riesgo significativo fue el Herbazal inundable, cuyo valor alcanzó 2%, equivalente a 4 ha (ver Figura 5).

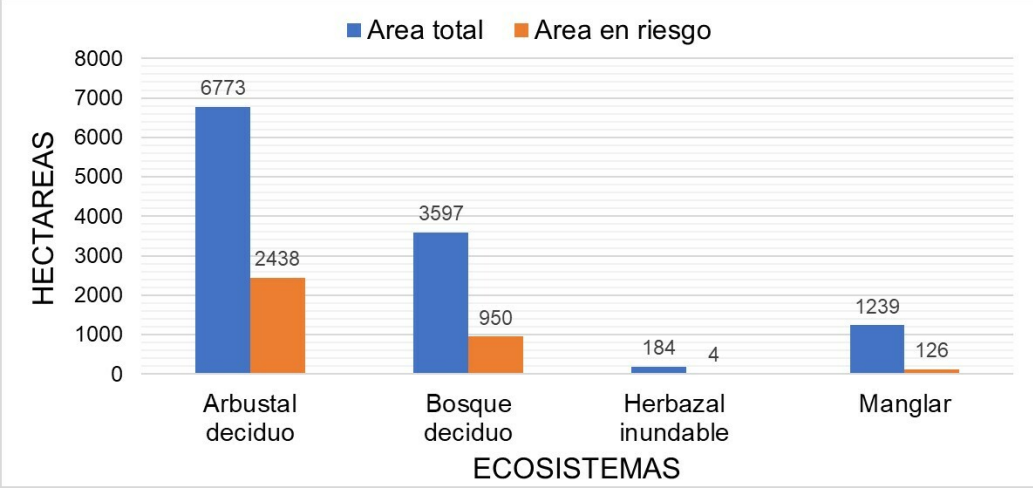


Figura 5. Grado de riesgo sobre la vegetación de los ecosistemas de la REAR.

Tabla 2. Coeficientes obtenidos del modelo de regresión lineal múltiple

Distancia de variables	Arbustal deciduo		Bosque Deciduo		Herbazal inundable		Manglar	
	Beta	*p*-valor	Beta	*p*-valor	Beta	*p*-valor	Beta	*p*-valor
Acuícola	**0.596**	0.000	0.017	0.000	0.030	0.000	**0.234**	0.000
Agrícola	**0.221**	0.000	**0.345**	0.000	**0.188**	0.000	**-0.553**	0.000
Pecuaria	**0.151**	0.000	**0.145**	0.000	**-0.334**	0.000	**-0.480**	0.000
Población	**0.123**	0.000	0.083	0.000	-0.060	0.160	**0.180**	0.000
Vías	0.016	0.000	**0.106**	0.000	0.056	0.000	0.040	0.000
R^2	**0.360**		**0.264**		**0.020**		**0.102**	

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

En la Figura 6 se demuestra que la cobertura dominante en el área de influencia de la REAR corresponde a las zonas de actividad acuícola, con una superficie de 1 994 ha, seguidas por la actividad pecuaria, con una extensión de 1 137 ha, y la actividad Agrícola con 657 ha. La cobertura con menor superficie corresponde a los Asentamientos poblacionales con un registro de 46 ha. Las principales vías de acceso dentro y fuera de la REAR cubrieron una longitud total de 148 km.

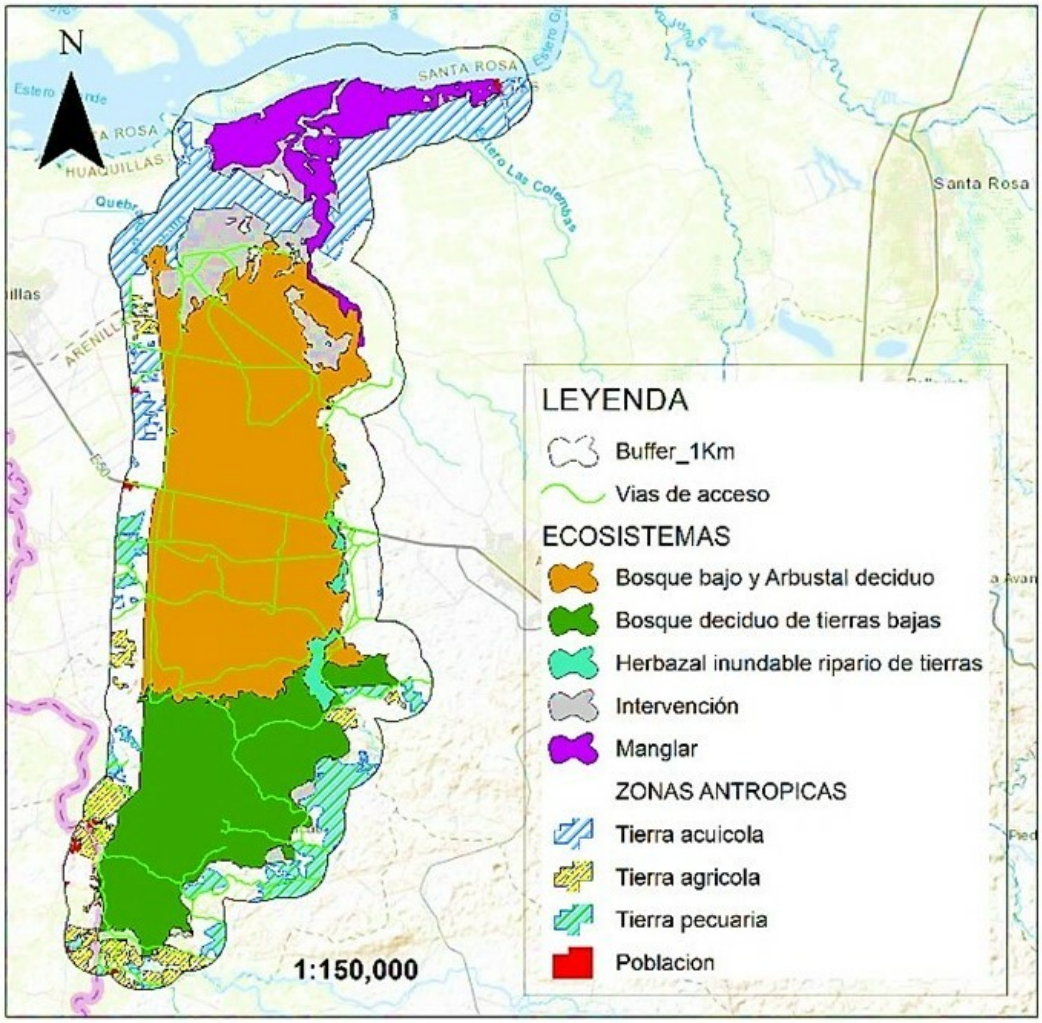


Figura 6. Cobertura y usos de suelos sobre el área de influencia de la REAR.

En la Tabla 2, en relación con el modelo establecido por Sierra (2013), se buscó estimar el riesgo de cambio en la cobertura vegetal para cada factor de deforestación, como fueron distancias a zonas: acuícola, agrícola, pecuaria, población y vías. Estas variables de deforestación presentaron un mismo nivel de significancia, a excepción de la variable población con el ecosistema Herbazal inundable, donde p-valor $= 0.000$ es menor al nivel de significancia $\alpha = 0.05$, es decir, que las distancias de las variables condicionan en mayor y menor grado la respuesta del estado de la vegetación en los ecosistemas de estudio. Los valores de Beta correspondieron a los coeficientes del modelo, que representa la elasticidad de la tendencia de que la cobertura vegetal de un sitio con coordenadas pueda ser convertida a otro uso de suelo. En cambio, R^2 como coeficiente de determinación explica cuánta variabilidad de

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

un factor puede ser causada por su relación con otro factor relacionado, es decir, es un cuantificador de la bondad de ajuste del modelo, lo que permite aproximarse a la fracción deforestada de cada uno de los ecosistemas de la REAR, lo que significa que los valores de R^2 por el 100% de las celdas con ese valor aproximen amenaza de riesgo sobre la cobertura vegetal en un 36% de Bosque Arbustal deciduo, 26.4% de Bosque deciduo, 2% de Herbazal inundable y 10.2% de Manglar.

Se evidenció que la variable de zonas acuícolas presentó coeficientes Beta positivos en los cuatro ecosistemas, revelando una probabilidad de mayor riesgo de cambio sobre la vegetación en el Bosque Arbustal deciduo, seguido de una moderada probabilidad de cambio en el ecosistema de Manglar. Sus valores de 0.596 y 0.234 demostraron que la variable de distancia de zonas acuícolas está relacionada con el estado y salud de la vegetación de los dos ecosistemas, patrón que no ocurre en la misma intensidad con el Bosque deciduo y Herbazal inundable (ver Figura 6). El aumento de la actividad acuícola intensiva en los últimos años sobre la zona noroeste de la Reserva ha ocupado grandes superficies, donde el mercado y la deficiente política agraria han sido parte de este crecimiento productivo (Agila y Lalangui, 2019). Aspecto parecido se revela en la investigación de Faruque y cols. (2022), donde señalan un aumento de área acuícola por área agrícola en el periodo 1990–2020, transformación que podría impactar negativamente a los bosques de manglares al suroeste de Bangladesh.

Con respecto a la variable de zonas agrícolas, los coeficientes Beta positivos se ubicaron en los ecosistemas de Bosque deciduo, Bosque Arbustal deciduo y Herbazal inundable, sus valores 0.345, 0.221 y 0.188 muestran una moderada a baja probabilidad de cambio boscoso respectivamente, es decir, a mayor distancia se encuentren las actividades agrícolas, menor será la pérdida de los bosques. En el caso del ecosistema Bosque Arbustal deciduo, la probabilidad de cambio podría ser contradictoria, pues a pesar de la cercanía de las zonas agrícolas, esta actividad se encuentra regulada bajo un plan de producción sostenible, producto de la concesión de casi 3 800 ha de tierras entregadas en el año 2014 por parte del Estado a grupos de productores de la zona (Ministerio del Ambiente del Ecuador MAE, 2015). Para el ecosistema de Manglar el valor del coeficiente fue negativo -0.553, lo que significa una incierta probabilidad de cambio de la vegetación por actividades agrícolas.

Para la variable de zona pecuaria, el análisis revela un valor de coeficiente promedio Beta de 0.148 para los ecosistemas de Bosque deciduo y Bosque Arbustal deciduo, significando una moderada probabilidad de cambio en sus coberturas boscosas. Según Hidalgo y cols. (2020) el incremento de la actividad pecuaria depende de la geografía y clima que presenta especialmente el Bosque deciduo, estableciéndose alrededor de 95% de la práctica ganadera en la zona limítrofe del sector sureste de la REAR. Por otro lado, los ecosistemas de Herbazal inundable y Manglar los valores de sus coeficientes Beta fueron negativos -0.334 y -0.480 respectivamente, lo que significa una indirecta relación que garantiza que el estado de la vegetación no tenga mayor riesgo frente a las actividades pastoriles en estas zonas.

La variable de distancia a poblaciones también influyó como factor de riesgo, especialmente en el ecosistema de Bosque Arbustal deciduo y Manglar. Sus valores de coeficientes Beta de 0.123 y 0.180, respectivamente, revelan una moderada probabilidad de cambio paisajístico localizado sobre los bordes de parches remanentes de bosques. El nivel socioeconómico de la población, relacionado con el analfabetismo y el bajo ingreso salarial, podría ser el causante de estos cambios (Cruz y cols., 2017; Pineda y cols., 2009). De acuerdo con la Figura 6, el poblado más cercano al ecosistema de Manglar es la Pitahaya en el norte. En cambio, para el Bosque bajo y Arbustal deciduo están los poblados de la Cooperativa Valdivia, El Cruce, El Telégrafo, El Mango y Carcabón en el sur. Las características de la aptitud del suelo que presentan los sectores poblados han servido de atractivos para el progresivo asentamiento humano. Es importante destacar que la Reserva no presenta asentamientos de viviendas en su interior, es decir, la afectación antrópica dentro de la Reserva es nula. En concordancia con los hallazgos de Baig y cols. (2022), la degradación persistente de las coberturas forestales no protegidas en Selangor, Malasia, se vincula estrechamente con la expansión de los asentamientos humanos y la conversión de terrenos para fines agrícolas, identificados como los vectores determinantes en la transición del uso del suelo.

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

El coeficiente Beta de la variable distancia a vías fue positivo en los cuatro ecosistemas (ver Tabla 2); sin embargo, los valores en los ecosistemas de Bosque Arbustal deciduo, Herbazal inundable y Manglar revelaron una probabilidad de cambio muy baja sobre la vegetación. En cambio, para el ecosistema de Bosque deciduo su probabilidad de cambio es significativo, registrando como valor (0.106). La construcción de vías principales permite que las personas de comunas aledañas puedan adentrarse al bosque, generando nuevos caminos de sendero con el propósito de extraer madera o deforestando para establecer áreas agrícolas (Delgado, 2012; García-Villacorta, 2009). Este patrón se localiza en mayor parte al suroeste de la Reserva, mientras que en el sector este la perturbación y amenaza no han tenido significancia debido a la poca accesibilidad por sus pronunciadas pendientes y altitud. De acuerdo con los hallazgos de Qian y cols. (2022) derivados de su modelo de impacto, los riesgos ecológicos a nivel de paisaje están condicionados por una interacción multivariada. En este sentido, la distancia a elementos antrópicos, el uso del suelo, la pendiente y la precipitación se consolidan como los principales factores determinantes de dicha dinámica. Contrariamente, en nuestra investigación no se consideraron los dos últimos factores por no tener acción directa con los cambios producidos por el hombre, creyendo importante relacionar el factor pendiente y precipitación en aspectos de otros servicios ecosistémicos como la calidad del agua.

4 Conclusiones

El análisis de los índices de vegetación (NDVI) mediante imágenes satelitales Sentinel-2B, permitió estimar el estado y salud de la vegetación natural en los cuatro ecosistemas (Bosque deciduo, Bosque Arbustal deciduo, Manglar, y Herbazal inundable) que conforman la REAR. Los valores promedio de los índices obtenidos fueron diferentes para cada zona. Los de mayor valor se registraron en el ecosistema Herbazal inundable y Manglar, mientras que en el Bosque Arbustal deciduo y Bosque deciduo alcanzaron valores bajos, significando una mayor perturbación y amenaza sobre la cobertura vegetal. Esto podría deberse a las condiciones óptimas de fertilidad que presentan sus suelos, así mismo, condiciones atmosféricas y al progresivo asentamiento humano que busca establecer cada día actividades productivas agropecuarias y acuícolas en la zona.

La interacción estadística del NDVI promedio con las variables de los ecosistemas y la aptitud suelo, permitió establecer que estas variables condicionan la respuesta del NDVI, determinando que el efecto de cada uno de ellos depende del otro. Este patrón se asemeja a la realidad del ecosistema intervenido en el interior de la REAR, especialmente localizada en el sector noroeste colindando con el Bosque Arbustal deciduo, la evolutiva degradación al suelo por la actividad acuícola intensiva y agrícola vienen alterando sus propiedades físicas, químicas y biológicas, aspectos importantes para el buen desarrollo de la vegetación.

En cuanto al análisis de los factores y grado de riesgo, se comprobó que los bordes este y oeste de los ecosistemas Bosque Arbustal deciduo y Bosque deciduo presentan las altas probabilidades de cambio paisajístico. Este mayor riesgo tiene que ver con la accesibilidad que las personas tienen para establecer actividades productivas en la zona de seguridad. Específicamente en la zona de amortiguamiento que, a pesar de estar regulada por el Estado, no cumple con lo estipulado, que es proteger los recursos naturales de las áreas protegidas.

Es importante indicar que si no se protegen las áreas adyacentes a la REAR, el poco bosque remanente que aún queda desaparecerá, limitando la conectividad con otros bosques naturales; por tal motivo, es importante que dentro del plan de manejo de la Reserva se tomen en cuenta las zonas de alto riesgo con un eficiente manejo de buenas prácticas agrícolas, pecuarias y acuícolas en su área de influencia, ya que al garantizar un buen funcionamiento podrían ser parte de la creación de corredores biológicos con las áreas de conservación municipal "El Conchal" en el sector norte y el bosque protector "Río Arenillas-Presa Tahuín" por el lado sureste.

Agradecimientos

Al Vicerrectorado de Investigación de la Universidad Técnica de Machala por el financiamiento adjudicado al Grupo de Investigación para la Conservación (INCON). Así mismo, se agradece a la Direc-

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

ción Provincial del Ambiente de El Oro, en especial a los guardaparques de la REAR, por el apoyo brindado al proyecto "Estimación de las propiedades físicas y químicas de suelos con enfoque ecosistémico de la zona de restauración en la Reserva Ecológica Arenillas" que, con la autorización N.º 007-2017-IC-S-DPAEO-MAE, de fecha 14 de agosto de 2017, se nos permitió realizar y concluir la investigación de manera significativa.

Declaración de uso de inteligencia artificial

Los autores DECLARAN que, durante la preparación del artículo titulado «Factores de cobertura y uso del suelo asociados al riesgo de degradación de la vegetación en la Reserva Ecológica Arenillas», no se utilizaron herramientas de inteligencia artificial generativa ni sistemas automatizados de asistencia para la redacción, análisis, interpretación de datos, generación de contenido, traducción o edición del manuscrito.

Los autores asumen plena responsabilidad por el contenido, la originalidad, la integridad y la versión final del artículo.

Contribución de los autores

J.E.M.M.: Conceptualización, Curación de datos, Investigación, Metodología, Administración de proyectos, Software y Escritura – borrador original.**H.E.A.L.:** Análisis formal, Supervisión y Escritura – revisión y edición. **D.A.P.L.:** Investigación, Recursos, Validación y Visualización.**A.D.L.F.:** Curación de datos, Análisis formal y Escritura – revisión y edición.

Referencias

Agila, R., y Lalangui, M. (2019, octubre). Análisis de los factores estratégicos que inciden en la producción camaronera ecuatoriana. En *Xxiv congreso internacional de contaduría, administración e informática* (pp. 1–29). Ciudad Universitaria, Ciudad de México, México.

Aldás, A. (2019). *Análisis de la dinámica temporal del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) para los años 1986, 2001 y 2017 en la reserva ecológica cotacachi cayapas, imbabura, mediante el uso de google earth engine* (Tesis de grado). Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Quito, Ecuador.

Armenteras, D., y Rodríguez, N. (2014). Dinámicas y causas de deforestación en bosques de latino américa: una revisión desde 1990. *Colombia Forestal*, *17*(2), 233–246. Online: https://shortlink.uk/1rmld

Baig, M. F., Mustafa, M. R. U., Baig, I., Takaijudin, H. B., y Zeshan, M. T. (2022). Assessment of land use land cover changes and future predictions using CA-ANN simulation for selangor, malaysia. *Water*, *14*(3), 402. Online: https://doi.org/10.3390/w14030402

Barber, C. P., Cochrane, M. A., Souza, C. M., y Laurance, W. F. (2014). Roads, deforestation, and the mitigating effect of protected areas in the amazon. *Biological Conservation*, *177*, 203–209. Online: http://dx.doi.org/10.1016/j.biocon.2014.07.004

Botta, G. F., Bienvenido, J. F., Antille, D. L., Rivero, E. R. D., Contessotto, E. E., Ghelfi, D. G., … Pelizzari, F. M. (2019). Effect of traffic with a light-weight tractor on physical properties of an aridisol soil in almeria, spain. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*, *51*(2), 270–279. Online: https://shortlink.uk/1wNro

Cantón, Y., Chamizo, S., Rodriguez-Caballero, E., Lázaro, R., Roncero-Ramos, B., Román, J. R., y Solé-Benet, A. (2020). Water regulation in cyanobacterial biocrusts from drylands: Negative impacts of anthropogenic disturbance. *Water*, *12*(3), 720. Online: https://doi.org/10.3390/w12030720

Carey, C., Dudley, N., y Stolton, S. (2000). *Squandering paradise?: The importance and vulnerability of the world's protected areas*. Gland, Switzerland: WWF-World Wide Fund For Nature International.

Cayuela, L. (2010). *Modelos lineales generalizados (GLM)*. Granada, España: EcoLab, Centro Andaluz de Medio Ambiente, Universidad de Granada.

Cervantes, F., Imbaquingo, J., y Leon, D. (2022). Valoración económica de los servicios ecosistémicos del bosque protector cerro blanco, guayaquil

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

ecuador. *Revista Geoespacial*, *19*(1), 50–63. Online: https://shortlink.uk/1wNrr

Clark, D. B. (2002). *Los factores edáficos y la distribución de las plantas*. Cártago, Costa Rica: LUR.

Cruz, M. A., Rodríguez, D. A., Villanueva, A., y Santillán, J. (2017). Factores sociales de uso del suelo y vegetación asociados a los incendios forestales en hidalgo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, *8*(41), 139–163. Online: https://shortlink.uk/1wNru

Delgado, V. (2012). La responsabilidad civil extracontractual por el daño ambiental causado en la construcción u operación de las carreteras. *Revista de Derecho (Valdivia)*, *25*(1), 47–76. Online: https://dx.doi.org/10.4067/S0718-09502012000100003

De Smith, M., Goodchild, M., y Longley, P. (2007). *Geospatial analysis: A comprehensive guide to principles, techniques and software tools* (2nd ed.). Troubador Publishing Ltd.

Eraso, O., Badia, A., y Gisbert, M. (2022). Google earth engine aplicado al monitoreo de superficies quemadas y cambios de coberturas y usos del suelo. *GeoFocus: Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, *29*, 89–113. Online: https://dx.doi.org/10.21138/GF.764

Faruque, M. J., Vekerdy, Z., Hasan, M. Y., Islam, K. Z., Young, B., Ahmed, M. T., … Kundu, P. (2022). Monitoring of land use and land cover changes by using remote sensing and GIS techniques at human-induced mangrove forests areas in bangladesh. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, *25*, 100699. Online: https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100699

Figueroa, F., y Sánchez-Cordero, V. (2011). Evaluación de la efectividad de las áreas protegidas para contener procesos de cambio en el uso del suelo y la vegetación. ¿un índice es suficiente? *Revista Mexicana de Biodiversidad*, *82*(3), 951–963. Online: https://shortlink.uk/1rmln

García-Villacorta, R. (2009). Diversidad, composición y estructura de un hábitat altamente amenazado: los bosques estacionalmente secos de tarapoto, perú. *Revista Peruana de Biología*, *16*(1), 81–92. Online: https://shortlink.uk/1wNry

Gomes, V., Queiroz, G., y Ferreira, K. (2020). An overview of platforms for big earth observation data management and analysis. *Remote Sensing*, *12*(8), 1253. Online: https://doi.org/10.3390/rs12081253

Gonzaga-Aguilar, C. (2015). Aplicación de índices de vegetación derivados de imágenes satelitales para análisis de coberturas vegetales en la provincia de loja, ecuador. *Revista CEDAMAZ*, *5*(1), 30–41. Online: https://shortlink.uk/1rmlt

Hartemink, A., y Bockheim, J. (2013). Soil genesis and classification. *Catena*, *104*, 251–256. Online: https://doi.org/10.1016/j.catena.2012.12.001

Hidalgo, M., Vargas, O., y Vite, H. (2020). Análisis situacional de la actividad ganadera en la parroquia palmales del cantón arenillas. *Revista Metropolitana de Ciencias Aplicadas*, *3*(2), 124–130. Online: https://shortlink.uk/1wNrF

Instituto de Ecología Aplicada ECOLAP, y Ministerio del Ambiente del Ecuador MAE. (2007). *Guía del patrimonio de Áreas naturales protegidas del ecuador*. Quito, Ecuador: ECOFUND, FAN, DarwinNet, IGM.

Leiva, J., Rocha, O. J., Mata, R., y Gutiérrez, M. (2009). Cronología de la regeneración del bosque tropical seco en santa rosa, guanacaste, costa rica: II. la vegetación en relación con el suelo. *Revista de Biología Tropical*, *57*(3), 817–836. Online: https://shortlink.uk/1wNrJ

Liu, Q., y Wang, L. (2021). t-test and ANOVA for data with ceiling and/or floor effects. *Behavior Research Methods*, *53*(1), 264–277. Online: https://doi.org/10.3758/s13428-020-01407-2

Maza-Maza, J. E., Sánchez-Asanza, A. W., Añazco Loaiza, H. E., y García-Ochoa, J. A. (2021). Estudio de las características físico-químicas del suelo en áreas prioritarias de la reserva ecológica arenillas. *Revista Científica Agroecosistemas*, *9*(3), 30–40. Online: https://shortlink.uk/1rmlB

Mesa-Sierra, N., de la Peña Domene, M., Campo, J., y Giardina, C. (2022). Restauración de bosques secos tropicales mexicanos: una revisión nacional. *Sustentabilidad*, *14*, 3937. Online: https://doi.org/10.3390/su14073937

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Ministerio de Agricultura y Ganadería del Ecuador MAG. (2016). *Geoportal del agro ecuatoriano.* Quito, Ecuador. Online: http://geoportal.agricultura.gob.ec/index.php/visor-geo

Ministerio del Ambiente del Ecuador MAE. (2013). *Sistema de clasificación de los ecosistemas del ecuador continental*. Quito, Ecuador: Ministerio del Ambiente del Ecuador.

Ministerio del Ambiente del Ecuador MAE. (2015). *Plan de manejo de la reserva ecológica arenillas* (Inf. Téc.). Quito, Ecuador: Ministerio del Ambiente del Ecuador.

Ministerio del Ambiente del Ecuador MAE. (2018). *Capa cartográfica de cobertura y uso de la tierra 2018 del ecuador continental [shapefile].* Sistema Nacional de Monitoreo de Bosques. Online: http://ide.ambiente.gob.ec/mapainteractivo/

Mittermeier, R. A., Turner, W. R., Larsen, F. W., Brooks, T. M., y Gascon, C. (2011). Global biodiversity conservation: The critical role of hotspots. En F. E. Zachos y J. C. Habel (Eds.), *Biodiversity hotspots: Distribution and protection of conservation priority areas* (pp. 3–22). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. Online: https://doi.org/10.1007/978-3-642-20992-5_1

Montealegre, F. (2017). *Evaluación espacio temporal de la productividad agrícola con índices de vegetación de diferencias normalizadas (NDVI) como herramienta para el ordenamiento territorial. caso de estudio: cuenca alta del arroyo napaleofú, provincia de buenos aires, argentina* (Tesis de Grado). Universidad Nacional de la Plata, La Plata, Argentina.

Moreno, A., Carda, V., Reyes, J. L., y Cano, P. (2018). Rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal: una alternativa de biofertilización para la agricultura sustentable. *Revista Colombiana de Biotecnología*, *20*(1), 68–83. Online: https://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v20n1.73707

Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación FAO. (2020). *El estado de los bosques del mundo 2020: Los bosques, la biodiversidad y las personas*. Roma, Italia: FAO.

Pineda, N. B., Bosque, J., Gómez, M., y Plata, W. (2009). Análisis de cambio del uso del suelo en el estado de méxico mediante sistemas de información geográfica y técnicas de regresión multivariantes: Una aproximación a los procesos de deforestación. *Investigaciones Geográficas*, *69*, 33–52. Online: https://shortlink.uk/1wNrV

Qian, Y., Dong, Z., Yan, Y., y Tang, L. (2022). Ecological risk assessment models for simulating impacts of land use and landscape pattern on ecosystem services. *The Science of the Total Environment*, *833*, 155218. Online: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155218

Ramírez, V., Aranda, L., y Rico-Gray, V. (2018). La resiliencia del bosque seco tropical: un seguro de vida para su conservación. CONABIO. *Biodiversitas*, *137*, 12–16. Online: https://shortlink.uk/1rmlN

Riofrío, I. (2018). *El bosque seco, una joya amenazada en el ecuador.* Mongabay. Online: https://es.mongabay.com/2018/07/ecuador-bosque-seco/ (Publicado el 05 de julio de 2018)

Ruiz, M. (2018). *Evaluación de la calidad y riesgo de la vegetación del bosque protector la ceiba y su área de influencia* (Tesis de grado). Universidad Técnica Particular de Loja, Loja, Ecuador.

Secretaría Nacional de Planificación. (2014). *Archivos de información geográfica.* Sistema Nacional de Información. Online: https://sni.gob.ec/coberturas (Accedido el 31 de diciembre de 2014)

Sierra, R. (2013). *Patrones y factores de deforestación en el ecuador continental, 1990-2010. y un acercamiento a los próximos 10 años*. Quito, Ecuador: Conservación Internacional Ecuador y Forest Trends.

Sudmanns, M., Tiede, D., Lang, S., Bergstedt, T., Trost, G., y Augustin, H. (2020). Big earth data: disruptive changes in earth observation data management and analysis? *International Journal of Digital Earth*, *13*(7), 832–850. Online: https://doi.org/10.1080/17538947.2019.1585976

Tapia-Armijos, M., Homeier, J., Espinosa, C., Leuschner, C., y de la Cruz, M. (2015). Deforestation and forest fragmentation in south ecuador since the 1970s – losing a hotspot of biodiversity. *PLoS ONE*, *10*(9), e0133701. Online: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0142359

Torres, R. C., Giorgis, M. A., Trillo, C., Volkmann, L., Demaio, P., Heredia, J., y Renison, D. (2014).

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Post-fire recovery occurs overwhelmingly by resprouting in the chaco serrano forest of central argentina. *Austral Ecology*, *39*(3), 346–354. Online: https://doi.org/10.1111/aec.12084

Union Internacional para la Conservacion de la Naturaleza IUCN. (2005). Benefits beyond boundaries: Proceedings of the vth IUCN world parks congress. En *The vth iucn world parks congress.* Durban, South Africa.

Union Internacional para la Conservacion de la Naturaleza IUCN. (2020). *Red list quadrennial report 2017-2020* (Inf. Téc.). IUCN.

Wright, S. J., y Muller-Landau, H. C. (2006). The future of tropical forest species. *Biotropica*, *38*(3), 287–301. Online: https://doi.org/10.1111/j.1744-7429.2006.00154.x

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

La Granja: Revista de Ciencias de la Vida
pISSN:1390-3799; eISSN:1390-8596
https://doi.org/10.17163/lgr.n44.2026.10

Artículo científico / Scientific paper

Ciencias Ambientales

Evaluación de la composición de aerosoles sedimentables en el área urbana del cantón Espíndola, provincia de Loja, Ecuador

Evaluation of the Composition of Settleable Aerosols in the Urban Area of Espíndola Canton, Loja Province, Ecuador

David Emmanuel del Pozo, María de los Angeles Alvarez* y Bryan Gabriel Valle

*Universidad Técnica Particular de Loja, Ecuador. [*https://ror.org/04dvbth24*]*

*Autor para correspondencia: mdalvarez8@utpl.edu.ec, mddel@utpl.edu.ec

Manuscrito recibido el 16 de abril de 2025. Aceptado, tras revisión el 9 de julio de 2025. Publicado el 1 de septiembre de 2026.

Resumen

El presente trabajo analiza la composición y concentración del material particulado sedimentable (MPS) en el área urbana del cantón Espíndola, con base en la limitada información sobre la calidad del aire en pequeñas comunidades rurales donde las emisiones vehiculares y la extracción de materiales representan fuentes de contaminación. Se planteó como objetivo determinar la concentración y composición química del MPS, específicamente la presencia de metales pesados como el cadmio (Cd), cromo (Cr), plomo (Pb) y cobre (Cu), comparando los resultados de las concentraciones de MPS con la normativa ambiental del Ecuador (Acuerdo Ministerial 097-A), que establece un valor límite de 1 mg/cm^2 por 30 días. La metodología empleó un muestreo sistemático durante cinco meses en cinco puntos del área urbana; por medio de métodos gravimétricos y análisis químicos se obtuvieron los resultados con base en las concentraciones de MPS, los cuales, pese a encontrarse por debajo del límite máximo permisible, identificaron la presencia de metales pesados en las muestras. La distribución de estos metales mostró mayor correlación con las variaciones mensuales que con el uso del suelo. Se concluye que, si bien los niveles de MPS cumplen con la normativa ambiental, no se exime la presencia de metales pesados. Estos hallazgos resaltan la relevancia de monitorear continuamente la calidad del aire en regiones rurales como Espíndola, donde las actividades humanas, aunque limitadas, pueden contribuir a la contaminación atmosférica y a la dispersión de elementos tóxicos.

Palabras clave: Material particulado sedimentable, metales pesados, contaminación atmosférica, métodos gravimétricos.

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Abstract

The present study analyzes the composition and concentration of settleable particulate matter (SPM) in the urban area of the Espíndola canton. It is based on the limited information available regarding air quality in small rural communities, where vehicular emissions and material extraction represent sources of pollution. The objective is to determine the concentration and chemical composition of SPM, specifically the presence of heavy metals such as cadmium (Cd), chromium (Cr), lead (Pb), and copper (Cu), comparing the SPM concentration results with Ecuador's environmental regulation (Ministerial Agreement 097-A), which establishes a limit value of 1 mg/cm^2 over 30 days. The methodology involved systematic sampling over five months at five points within the urban area. Using gravimetric methods and chemical analyses, results were obtained based on SPM concentrations. Although levels were below the maximum permissible limit, the presence of heavy metals was identified in the SPM samples. The distribution of these metals showed a stronger correlation with monthly variations than with land use. It is concluded that, while SPM levels comply with environmental regulations, the presence of heavy metals cannot be ruled out. These findings highlight the importance of continuously monitoring air quality in rural regions such as Espíndola, where human activities, although limited, may contribute to atmospheric pollution and the dispersion of toxic elements.

Keywords: Settleable particulate matter, heavy metals, air pollution, gravimetric methods.

Forma sugerida de citar: del Pozo, D. E., Álvarez, M. A. y Valle, B. G. (2026). Evaluación de la composición de aerosoles sedimentables en el área urbana del cantón Espíndola, provincia de Loja, Ecuador. *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida*. Vol. 44(2):171-184. https://doi.org/10.17163/lgr.n44.2026.10.

Orcid IDs:

David Emmanuel del Pozo Meza: https://orcid.org/0009-0008-9162-7410
María de los Angeles Alvarez Correa: https://orcid.org/0009-0008-5236-9498
Bryan Gabriel Valle Esparza: https://orcid.org/0009-0002-0689-7640

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

1 Introducción

La calidad del aire es un problema global que no se limita a una región específica, ya que el aire no tiene fronteras geográficas (Pérez Cárdenas, 2017). Los contaminantes atmosféricos, como el material particulado sedimentable (MPS), pueden ser transportados por el viento y afectar áreas menos contaminadas, ocasionando efectos adversos en la salud humana, los ecosistemas y la seguridad alimentaria (OPS, 2018). El MPS se define, según el anexo 4 del Acuerdo Ministerial 097-A, como las partículas sólidas o líquidas que, por acción de la gravedad, se depositan sobre una superficie horizontal, y cuyo tamaño permite su recolección en dispositivos estáticos durante un periodo determinado. Estas partículas están relacionadas con diversas fuentes, tanto naturales como antropogénicas. Entre las primeras se encuentran el polen, las esporas, los incendios forestales y las erupciones volcánicas (Suárez y Vásquez, 2017). Sin embargo, las actividades humanas, como la combustión de combustibles fósiles, las actividades industriales y el transporte vehicular, generan la mayor cantidad de contaminantes (Morocho, 2024).

El material particulado sedimentable (MPS) es un componente importante de la contaminación del aire (P. Santillán y cols., 2021). Este incluye partículas de diámetro aerodinámico mayor a 10 micrómetros ($PM_{>10}$), que debido a su tamaño no permanecen suspendidas en el aire por mucho tiempo, sedimentándose rápidamente sobre el suelo y otras superficies (Suárez y Vásquez, 2017). Su composición química incluye tanto metales pesados (Cd, Cr, Pb, Cu, Mg, Zn, Al, Ni, Mn), como aniones (cloruros, nitratos y sulfatos), que representan un riesgo significativo para la salud humana y el medio ambiente, debido a su toxicidad y capacidad de acumulación en la cadena alimentaria (Reyes y cols., 2016; Mejía y cols., 2018).

En Ecuador, la problemática de la calidad del aire afecta tanto a las grandes ciudades como a zonas rurales con menor desarrollo industrial (López y cols., 2022). Ciudades como Quito y Cuenca se han destacado por la inversión de recursos destinados al monitoreo de contaminantes atmosféricos, entre ellos el material particulado sedimentable, que ha permitido identificar concentraciones de hasta 2.86 mg/cm^2 por 30 días en la ciudad de Quito, según el reporte de la calidad ambiental del año 2013 (Municipio del Distrito Metropolitano de Quito, 2015). Por otra parte, en la ciudad de Cuenca se han registrado concentraciones más bajas entre 0.28 y 0.35 mg/cm^2 por 30 días (EMOV EP, 2021), reflejando la presencia de concentraciones variables de MPS, incluso en zonas de mayor monitoreo.

Algunos estudios han demostrado que factores como la resuspensión eólica del polvo urbano y el tráfico vehicular son fuentes significativas de partículas sedimentables, especialmente en zonas con infraestructura vial deficiente o tráfico lento que, en combinación con factores estacionales, contribuyen significativamente a la distribución y concentración de MPS y sus componentes en el aire (Valencia y cols., 2019; Villacis, 2023). A pesar de ello, los estudios sobre contaminación del aire en áreas rurales pequeñas son limitados o inexistentes, resaltando la importancia de investigaciones que evalúen la composición y los efectos de las partículas sedimentables en estos lugares (Solórzano, 2023).

El cantón Espíndola, en la provincia de Loja, presenta un contexto particular por ser una zona fronteriza con constante tránsito de transporte pesado, sumado a la presencia de actividades extractivas que podrían contribuir a la emisión de contaminantes atmosféricos que afectan la salud de los 1388 habitantes que residen en su área urbana (INEC, 2001). Por tal razón, el presente estudio tiene como objetivo principal evaluar la composición de aerosoles sedimentables en el área urbana del cantón Espíndola, con énfasis en la identificación de la concentración de material particulado sedimentable y la evaluación de la presencia de metales pesados en su composición.

2 Materiales y Métodos

2.1 Área de Estudio

El estudio se llevó a cabo en la zona urbana del cantón Espíndola, en la parroquia Amaluza, donde se seleccionaron cinco puntos representativos mediante un muestreo aleatorio estratificado.

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Tabla 1. Distribución de puntos de muestreo

Sector	Punto	Uso de suelo	Descripción
Centro	1	CM	Centro urbano con alto tráfico vehicular.
Terminal	2	EQ2	Caracterizado por flujo continuo de vehículos.
Río	3	IND	Presencia de talleres mecánicos, balnearios y minería de áridos cercana.
Dolorosa	4	R1	Cercano a vías sin pavimentar.
Colegio	5	EQ1	Alto flujo vehicular asociado al horario escolar.

Puntos de muestreo y distribución en base al uso de suelo. Comercial (CM), Equipamiento de servicios sociales (EQ1), Equipamiento de servicios públicos (EQ2), Industrial (IND), Residencial (R1).

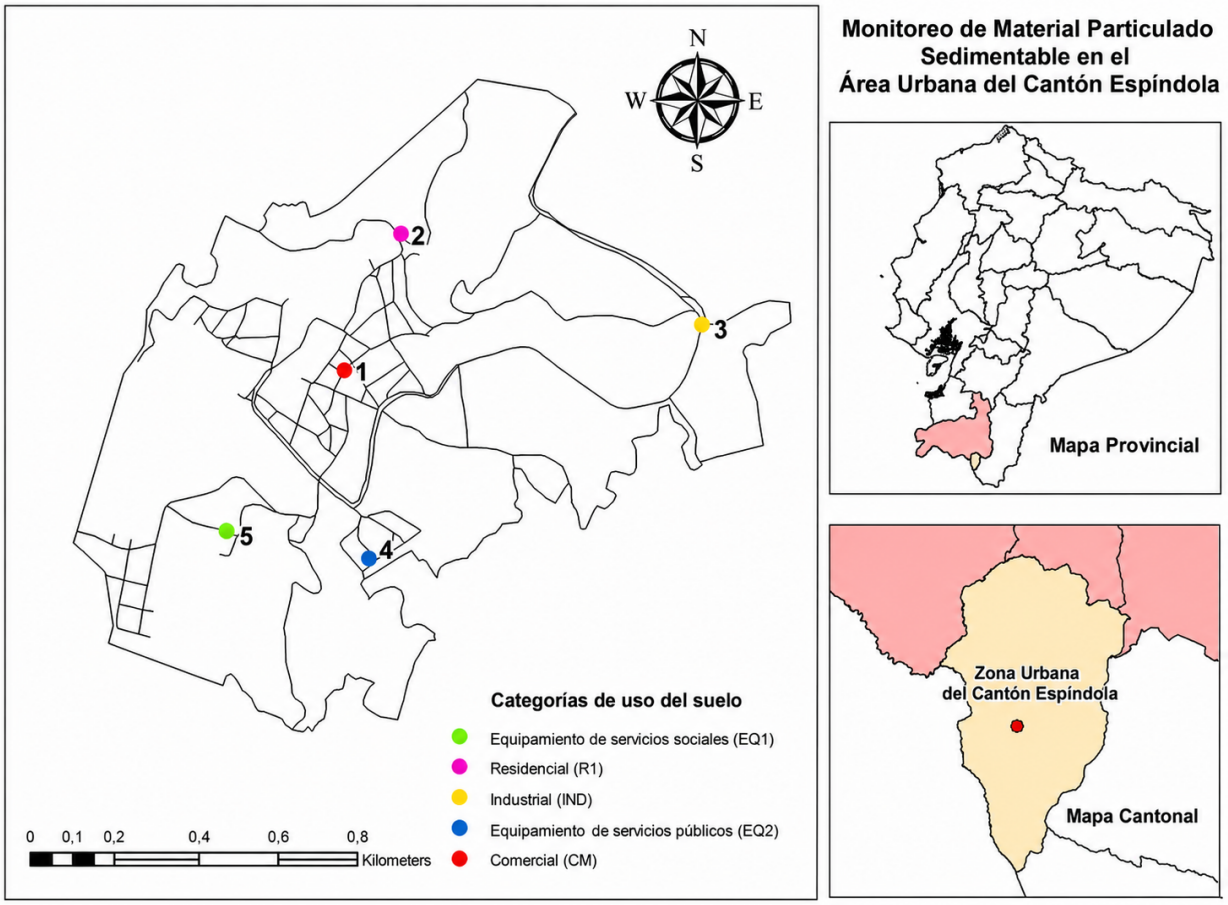


Figura 1. Mapa de ubicación de los puntos de muestreo

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

2.2 Información meteorológica del cantón Espíndola

De forma complementaria al muestreo de MPS, se recopiló información disponible sobre las condiciones meteorológicas predominantes del cantón Espíndola durante el periodo de muestreo. De acuerdo con los datos históricos del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), 2024) y del Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal de Espíndola (Gobierno Autónomo Descentralizado (GAD) Municipal de Espíndola, 2015), durante este periodo (marzo - julio) se presenta una marcada transición entre la época lluviosa y seca en la región. Por tanto, se recopilaron variables como precipitación, velocidad y dirección del viento, las cuales fueron tomadas en cuenta para el análisis de resultados, con el objetivo de relacionarlas con la dinámica del material particulado sedimentable.

2.3 Diseño e instalación de captadores

Los captadores de material particulado sedimentable (MPS) fueron diseñados siguiendo el Método 502 del manual *Methods of Air Sampling and Analysis* (Intersociety Committee, 1988) y en cumplimiento del Acuerdo Ministerial 097-A. Están fabricados con tubería de PVC de 15.24 cm de diámetro y un embudo del mismo tamaño, conectado a un contenedor de plástico de un galón. En la parte superior cuenta con una malla electrosoldada que filtra contaminantes gruesos, garantizando muestras representativas. Los captadores se instalaron a más de 2.5 metros sobre el nivel del suelo.



Figura 2. Captador de Material Particulado Sedimentable.

2.4 Recolección de muestras

El periodo de muestreo tuvo una duración de cinco meses continuos, buscando abarcar dos épocas estacionales entre los meses de marzo y julio del año 2024. La recolección de muestras se realizó cada 30 días conforme a los lineamientos establecidos en el anexo 4 del Acuerdo Ministerial 097-A. Una vez transcurrido ese tiempo se retiraron las muestras, realizando previamente un lavado con agua destilada para arrastrar las partículas adheridas tanto en las paredes del tubo del captador, como en el embudo, hacia el envase colector. Finalmente, se instaló un nuevo envase para la recolección de la muestra del siguiente mes.

Las muestras llevadas al laboratorio fueron separadas en fracciones solubles e insolubles, mediante la aplicación del método gravimétrico.

2.5 Análisis gravimétrico

Para cuantificar el material particulado sedimentable (MPS), se utilizaron filtros de cuarzo de 47 mm y cápsulas de porcelana, secados a 105 °C en la estufa para pesarse antes y después de la filtración. El equipo de filtración al vacío permitió la retención eficiente de partículas en los filtros. La concentración de MPS se calculó en mg/cm^2 por 30 días, utilizando la diferencia de peso entre los filtros y cápsulas antes y después del proceso, mediante la

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

aplicación de las siguientes ecuaciones en el software Microsoft Excel:

La tasa de caída de partículas insolubles se determinó mediante la ecuación (1):

$$Cf = \frac{Pf - Pi}{AT} \quad (1)$$

Donde: Cf es la concentración de partículas insolubles; Pi es el peso inicial del filtro antes de filtrar; Pf es el peso final del filtro después de filtrar; A representa el área de apertura del contenedor de precipitación de partículas expresada en m^2; y T es el tiempo de duración del monitoreo (30 días).

Para el cálculo de las tasas de caída de partículas solubles se empleó la ecuación (2):

$$Cs = \frac{(Mfs - Mis)}{AT} \frac{V1}{V2} \quad (2)$$

Donde: Cs es la concentración de partículas solubles; Mis es el peso inicial de la cápsula antes de filtrar; Mfs es el peso final de la cápsula después de filtrar; A es el área de apertura del contenedor de precipitación de partículas en m^2; T denota el tiempo de duración del monitoreo (30 días); $V1$ corresponde al volumen de todo el líquido filtrado expresado en litros; y $V2$ equivale al volumen de todo el líquido extraído convertido en litros.

Finalmente, la tasa total de caída de partículas se obtuvo a través de la ecuación (3):

$$Ct = Cu + Cs \quad (3)$$

Donde: Ct representa la tasa total de precipitación de partículas expresada en g/m^2 al mes; Cu es la tasa de caída de partículas insolubles en g/m^2 al mes; y Cs es la tasa de caída de partículas solubles expresada igualmente en g/m^2 al mes.

2.6 Comparación con límites establecidos para MPS

Para determinar si las concentraciones del material particulado exceden los límites recomendados, se tomaron como referencia los valores estipulados por el anexo 4 del Acuerdo Ministerial 097-A, como se detalla en la Tabla 2.

Tabla 2. Límite máximo permisible para MPS

Legislación Ambiental Ecuatoriana TULSMA AM-097, Anexo 4
1 mg/cm^2 por 30 días

El valor de referencia corresponde a una concentración acumulada durante 30 días.

2.7 Digestión ácida y análisis de metales

Para evaluar metales pesados en el material particulado sedimentable (MPS), se realizó una digestión ácida asistida por microondas. Las muestras se incineraron a 500 °C durante tres horas para eliminar la materia orgánica, luego se trataron con 9 ml de ácido nítrico (HNO3) y 3 ml de ácido fluorhídrico (HF). La mezcla se digirió en microondas siguiendo el método US EPA 3052, se enfrió, filtró y diluyó a 25 ml con agua destilada.

La concentración de metales pesados se determinó mediante espectroscopía de absorción atómica (AA), utilizando estándares certificados para garantizar la precisión del análisis. Se seleccionaron cuatro metales: cobre (Cu), plomo (Pb), cadmio (Cd) y cromo (Cr), debido a su alta toxicidad y presencia común en fuentes antrópicas asociadas al transporte y actividades extractivas (Morales Tates y cols., 2024; Dall'Osto y cols., 2014). Además, esta selección se basó en la disponibilidad de insumos y reactivos y en el objetivo central del estudio, orientado a identificar la presencia o ausencia de metales pesados en el material particulado sedimentable.

3 Resultados y Discusión

Las condiciones climáticas recopiladas del Cantón Espíndola se describen en la Tabla 3. Durante los cinco meses de monitoreo el cantón atravesó una transición estacional característica de la región surandina del Ecuador, pasando de una época lluviosa a una seca, viéndose reflejada en la disminución de las precipitaciones y en el aumento en la velocidad del viento a partir del mes de mayo.

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Tabla 3. Condiciones climáticas en el Cantón Espíndola

Mes	Precipitación promedio (mm)	Velocidad promedio del viento (km/h)	Dirección predominante
Marzo	160–200	8–12	Este–Noreste
Abril	130–170	9–14	Este–Noreste
Mayo	60–90	11–16	Este–Noreste
Junio	25–45	14–20	Este–Noreste
Julio	10–25	15–22	Este–Noreste

Intervalos de precipitación, velocidad del viento y dirección predominante.

Tabla 4. Caracterización química de MPS

Uso de suelo	Punto	Mes	MPS (mg/cm^2 × 30 días)	Cd (μg/L)	Cu (μg/L)	Pb (μg/L)	Cr (μg/L)
CM	1	Marzo	0.17	51.4	262.3	696.5	5.7
EQ1	2		0.22	217.4	282.1	1 042.2	21
IND	3		0.43	49.3	310.7	919.9	100.5
R1	4		0.28	41.2	234.1	872	7
EQ2	5		0.3	28.3	150.4	563.5	0
EQ1	2	Abril	0.39	31.4	157.2	662.5	69
IND	3		0.42	28.8	180.1	777.2	0
R1	4		0.22	25.1	131.8	580	0
EQ2	5		0.28	684	176.3	910.2	95.1
CM	1	Mayo	0.3	46.3	320	908.7	8.3
EQ1	2		0.31	67.1	277.6	837.6	89
IND	3		0.35	81.7	257.6	836.3	87.1
R1	4		0.27	108	213.7	758.3	72.5
EQ2	5		0.38	130.9	353.6	1 235.2	163.1
CM	1	Junio	0.25	38	242.6	769.9	0
EQ1	2		0.27	39.2	192.9	771.3	76.9
IND	3		0.51	43.8	350.3	910.5	95.5
R1	4		0.33	41.3	365.1	1 075.2	38
EQ2	5		0.25	19	130.5	538.6	0.3
CM	1	Julio	0.21	20.1	116	538.5	0
EQ1	2		0.3	17.7	112.8	536.8	0
IND	3		0.33	9.2	111.8	537.3	0
R1	4		0.27	19	216.6	703	68
EQ2	5		0.23	19.3	109.6	509.8	29

El MPS se expresa en mg/cm^2 por 30 días y Cd, Cu, Pb y Cr en μg/L. No se registraron concentraciones de MPS superiores al límite normativo de 1 mg/cm^2 por 30 días.

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Las concentraciones del material particulado sedimentable (MPS) y metales pesados (Cd, Cu, Pb, Cr) obtenidos durante cinco meses de monitoreo continuo en diferentes usos de suelo se presentan en la Tabla 4. Si bien las concentraciones de MPS se mantuvieron dentro de los límites máximos permisibles de la normativa ambiental ecuatoriana, el análisis reveló la presencia de metales pesados, siendo el plomo el elemento más abundante. A pesar de que Ecuador eliminó el plomo en la gasolina en 1998 (Ministerio de Energía y Minas, 1998), sus efectos persisten debido a la acumulación histórica de este metal en suelos y sedimentos, que pueden liberarse nuevamente al medio ambiente (Tong y cols., 2016). En América Latina, la combinación de fuentes agrícolas, residuos de combustibles con plomo y materiales de construcción deteriorados genera perfiles atmosféricos complejos (Bergametti y cols., 2020; Iglesias y cols., 2012). Esta presencia de metales pesados concuerda con lo reportado en la literatura, donde se asocian a procesos industriales, desgaste vehicular y abrasión de sus componentes metálicos (Huang y cols., 2022).

La Figura 3 revela las concentraciones de material particulado sedimentable (MPS) en cada punto de muestreo, destacando al punto de muestreo número 3 (IND), ubicado en un área de uso industrial, como el que presentó las concentraciones más elevadas, con un promedio de 0.41 mg/cm^2 por 30 días y un pico máximo de 0.51 mg/cm^2 por 30 días. Estos valores podrían sugerir la influencia combinada de fuentes fijas y móviles en la zona industrial, como la extracción de materiales áridos y el tránsito de vehículos pesados, factores que propician la liberación y dispersión de partículas en la zona (Alloway, 2013; Muñoz P. y cols., 2021). Igualmente, en las zonas de uso industrial pueden intervenir otras fuentes, como talleres de mecánica y actividades de procesamiento de materiales áridos locales, que, aunque no siempre se encuentren formalmente registradas, pueden emitir partículas enriquecidas con metales como Cu y Cr. Estos sectores, al generar polvo resuspendido y desgaste de materiales metálicos, representan una fuente significativa de contaminantes atmosféricos en ambientes urbanos e industriales no regulados (Huang y cols., 2022; BaLich y cols., 2024). Por otra parte, el punto 1 (CM), asociado a un uso de suelo comercial, presentó las concentraciones más bajas, con una media de 0.23 mg/cm^2 por 30 días.

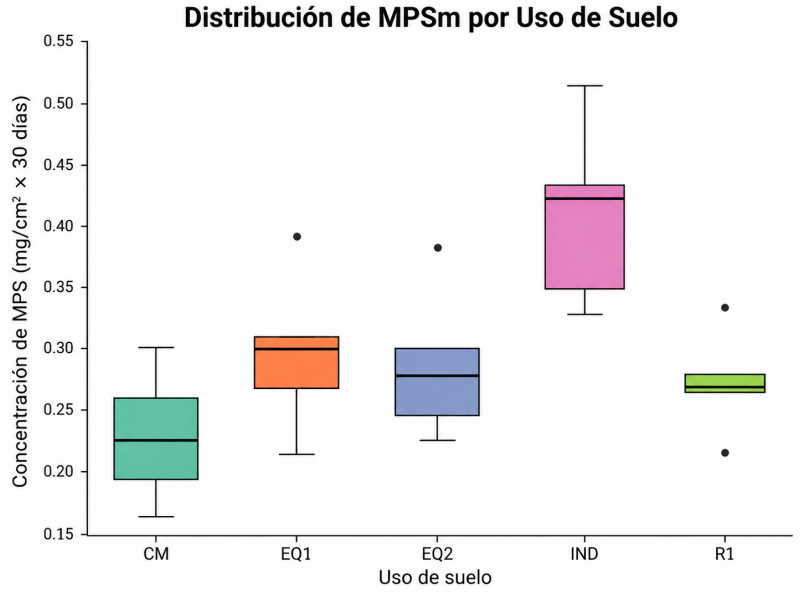


Figura 3. Diagrama de cajas de las concentraciones de material particulado sedimentable según el uso del suelo.

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

La Figura 4 presenta las concentraciones de MPS a lo largo de los cinco meses de monitoreo, evidenciando una relativa estabilidad en los promedios mensuales, que oscilan entre 0.27 y 0.33 mg/cm^2 por 30 días. Pese a que durante este periodo se produce una transición climática marcada por la disminución progresiva de las lluvias y el aumento en la velocidad del viento desde mayo en adelante (Tabla 3), no se observaron diferencias considerables en las concentraciones promedio de MPS entre meses, mostrando que las condiciones meteorológicas por sí solas no explican completamente la variabilidad del material particulado sedimentable. La disminución de precipitaciones podría reducir el lavado atmosférico de partículas, mientras que el aumento de la velocidad del viento favorece la resuspensión de partículas previamente depositadas, facilitando el transporte de partículas, efecto que puede amplificarse en superficies sin pavimentar, zonas agrícolas secas y áreas industriales con baja cobertura vegetal (Zhao y cols., 2018).

Por otra parte, al analizar la dispersión de los datos se puede observar que los rangos de las concentraciones tienden a ser más estrechos en los meses más secos, lo cual podría deberse a factores como el tipo de uso del suelo, la intensidad del tráfico vehicular y las actividades locales que ejercen una mayor influencia sobre las concentraciones de MPS. Esto puede observarse durante el mes de junio, cuando se registró la concentración más alta del estudio (0.51 mg/cm^2 en 30 días) en la zona de uso industrial (IND).

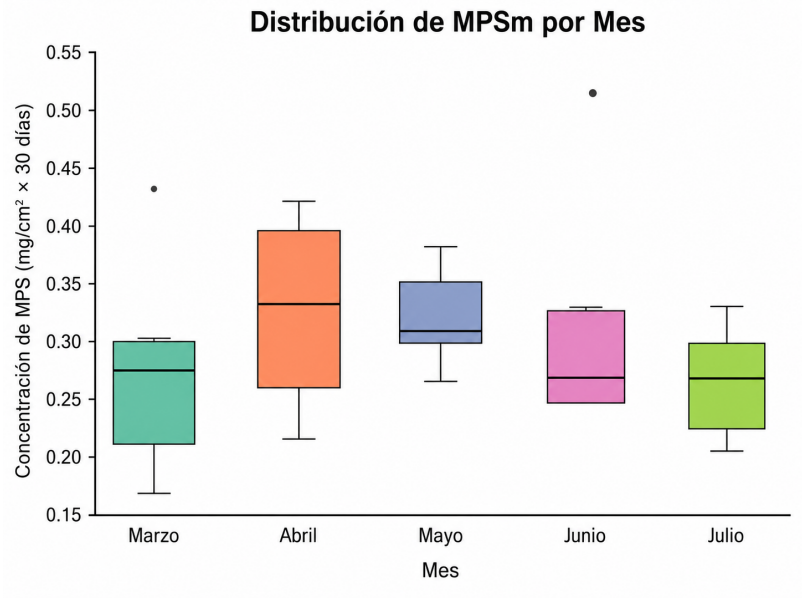


Figura 4. Diagrama de cajas de las concentraciones de material particulado sedimentable según el mes.

La Figura 5 muestra los resultados de la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis, revelando diferencias significativas en las concentraciones de MPS según el uso del suelo ($p = 0.020$), lo que sugiere que los niveles de material particulado sedimentable varían en función de las actividades y características ambientales propias de cada zona.

De forma similar, la prueba de Kruskal-Wallis aplicada a las concentraciones mensuales (Figura 6) muestra diferencias estadísticamente significativas para Cd, Cu y Pb ($p = 0.006$, 0.015 y 0.038, respectivamente). Estas fluctuaciones mensuales podrían atribuirse a factores como la orografía de Espíndola y la dinámica del transporte atmosférico, que podrían favorecer el arrastre de contaminantes desde otras zonas en función de las condiciones meteorológicas, así como a la estacionalidad de actividades agrícolas.

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

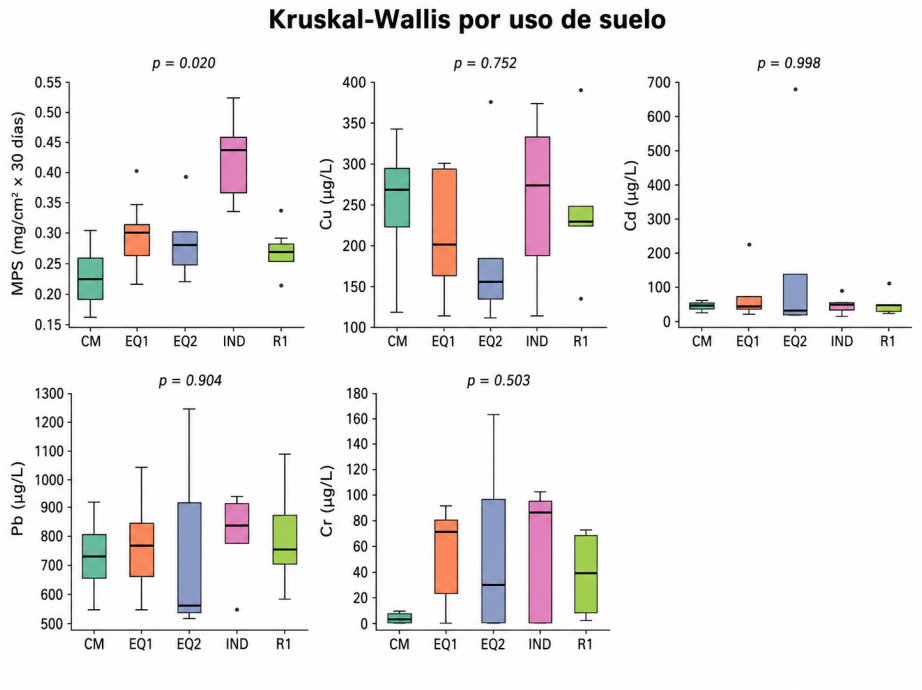


Figura 5. Prueba de kruskal-Wallis para diferencia de medias entre las concentraciones de MPS y metales por uso de suelo

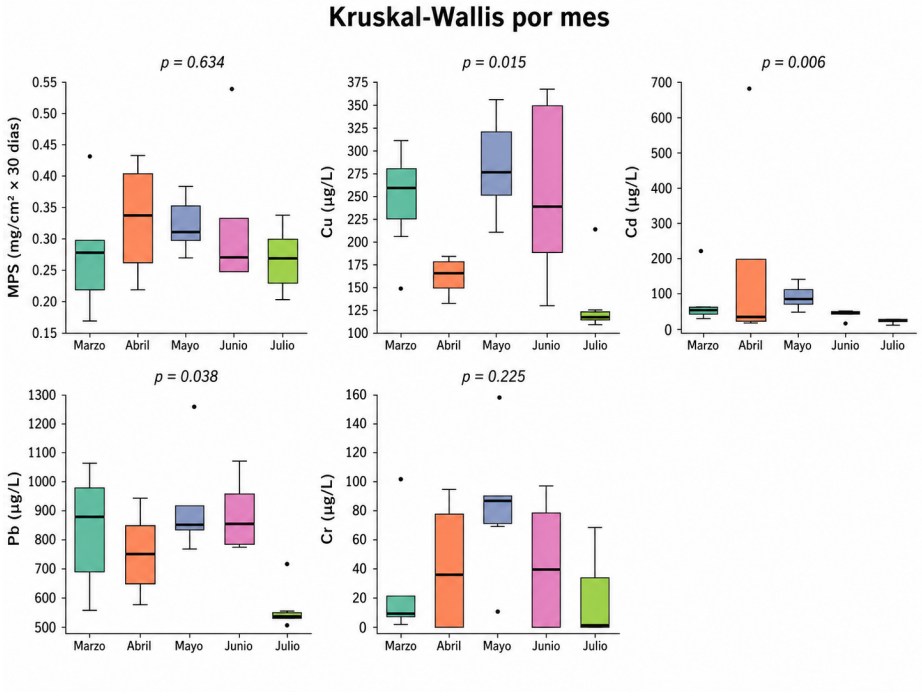


Figura 6. Prueba de kruskal-Wallis para diferencia de medias entre las concentraciones de MPS mensuales.

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

El análisis de correlación de Spearman, cuyos resultados se resumen en la Figura 7, reveló una correlación positiva significativa entre Pb y MPS ($r = 0.421$, $p = 0.040$), así como entre Cr y MPS ($r = 0.435$, $p = 0.033$), lo que sugiere que estos metales tienden a acumularse o transportarse junto con el material particulado sedimentable, posiblemente debido a su afinidad por las partículas sólidas presentes en el aire y el suelo (Guo y cols., 2021; Zhao y cols., 2018). Además, se observaron correlaciones significativas entre los metales Cd, Cu, Pb y Cr, destacando especialmente la fuerte relación entre Pb y Cu ($r = 0.893$, $p = 0.000$), lo que apunta a la posibilidad de una interacción geoquímica o una fuente de emisión común provocada por el tráfico vehicular, abrasión de neumáticos, frenos y combustibles, así como del polvo resuspendido en áreas urbanas no pavimentadas (BaLich y cols., 2024; Cesari y cols., 2012; Huang y cols., 2022).

Estas correlaciones entre metales podrían estar influenciadas por las condiciones agroambientales y el manejo de suelos en Espíndola. Específicamente, la aplicación de fertilizantes fosfatados y plaguicidas en cultivos como café y caña de azúcar, prácticas comunes en la región, podría explicar la presencia de Cd, como señala Alloway (2013), quien identifica a estos insumos agrícolas como una fuente relevante de este metal en el suelo. Adicionalmente, la persistencia de Pb y Cu en partículas orgánicas y minerales, como se ha documentado en áreas impactadas por actividades agrícolas (Zhang y cols., 2020; Wang y cols., 2022), podría contribuir a la fuerte correlación observada entre estos dos metales.

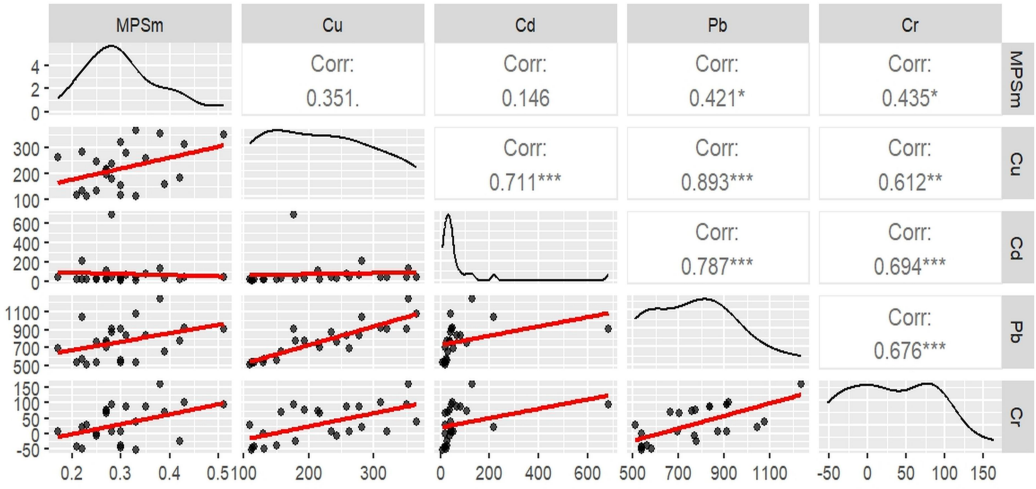


Figura 7. Matriz de correlación de Spearman entre el material particulado sedimentable y los metales analizados.

La correlación observada entre metales pesados como cadmio (Cd), cromo (Cr), plomo (Pb) y cobre (Cu) en el material particulado sedimentable está más influenciada por factores mensuales que por el uso del suelo en la zona estudiada. Estos metales son capaces de adherirse a partículas sólidas presentes en el aire y el suelo, como minerales (silicatos y óxidos de hierro) y materia orgánica, que actúan como vectores para su transporte y acumulación en diferentes áreas (Saeedi y cols., 2015). Este comportamiento se debe a la interacción de los metales con las superficies de estas partículas, donde quedan atrapados y protegidos frente a procesos de lixiviación, especialmente bajo condiciones de viento o disturbios mecánicos provocados por actividades humanas (Guo y cols., 2021; Zhao y cols., 2018).

El Pb y el Cu tienden a tener lugar en áreas impactadas por actividades agrícolas, ya que su persistencia en partículas orgánicas y minerales facilita su acumulación en suelos y sedimentos (Valdivieso y cols., 2024). Estas asociaciones están estrechamente vinculadas al uso de fertilizantes y pesticidas que contienen compuestos metálicos, lo que intensifica su presencia en el ambiente (Villacis, 2023). En contraste, la movilidad de metales como el Cr y Cd es mayor en ambientes ácidos, lo cual es co-

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

mún en suelos agrícolas perturbados por el uso de fertilizantes, plaguicidas y actividades de labranza. Según Abad (2014), estos compuestos, al estar solubilizados, pueden adherirse a partículas finas y facilitar su transporte aéreo, sobre todo en condiciones secas y ventosas. Esto puede observarse particularmente durante las estaciones secas, cuando la reducción de la humedad en el suelo y el aumento de la actividad del viento favorecen la dispersión de partículas contaminadas (Zhang y cols., 2020; Wang y cols., 2022).

Este patrón de correlación refleja las propiedades intrínsecas de los metales, como su afinidad por partículas minerales y orgánicas, así como la posible influencia de las condiciones climáticas específicas del área de estudio (Zegarra y cols., 2020). Las variaciones estacionales, especialmente durante periodos secos, podrían intensificar la movilidad de partículas cargadas de metales (Lara, 2022). La acción del viento en estas estaciones favorece la resuspensión y el transporte de material particulado sedimentable a largas distancias, redistribuyendo los metales en el ambiente (G. Santillán y cols., 2025). Esto resalta cómo las posibles dinámicas climáticas locales pueden contribuir a la dispersión y acumulación de Cd, Cr, Pb y Cu, contribuyendo a patrones de concentración marcados por variaciones mensuales (Wang y cols., 2022; Zhang y cols., 2020).

4 Conclusiones

Se detectaron incrementos puntuales en determinados periodos, asociados a posibles factores locales y estacionales. Además, la caracterización química evidenció la presencia de metales pesados como Cd, Cr, Pb y Cu en las muestras, incluso en áreas con concentraciones totales de MPS bajas. Estos hallazgos resaltan que, aunque el MPS cumpla con los estándares establecidos, su composición química puede representar riesgos para el ambiente y la salud humana.

Las correlaciones estadísticas sugieren que factores como la intensidad de los vientos, la orografía del terreno, la cercanía a fuentes específicas de emisión, y la movilización de partículas por actividades humanas desempeñan un papel crucial en la dispersión y acumulación de estos elementos. Se observó que las dinámicas climáticas locales, como los periodos secos y la resuspensión de partículas, aumentan la presencia de metales en el aire.

En conjunto, los resultados indican que la dinámica del material particulado sedimentable en Espíndola está determinada principalmente por condiciones locales específicas y la naturaleza de las fuentes emisoras, mientras que la influencia climática, si bien presente, no parece ser el factor predominante en la variabilidad de las concentraciones de MPS; no obstante, se encontró una influencia de la variación climática sobre los metales (Cd, Pb, Cu) a lo largo de los meses.

Agradecimientos

Agradecemos a la Universidad Técnica Particular de Loja por el apoyo y el financiamiento brindado en el desarrollo de esta investigación. Su respaldo fue clave para llevar a cabo el estudio y el análisis de los datos.

Declaración de uso de inteligencia artificial

Los autores DECLARAN que, durante la preparación del artículo titulado «Evaluación de la composición de aerosoles sedimentables en el área urbana del cantón Espíndola, provincia de Loja, Ecuador», se utilizaron herramientas de inteligencia artificial generativa exclusivamente como apoyo en la traducción y mejora de redacción de apartados puntuales del manuscrito. Estas herramientas no fueron empleadas para el análisis, interpretación de datos, generación de resultados, elaboración de conclusiones ni sustitución del criterio académico y científico de los autores.

Los autores asumen plena responsabilidad por el contenido, la originalidad, la integridad y la versión final del artículo.

Contribución de los autores

M.A.A.C.: Conceptualización, análisis de datos, muestreo. **B.G.V.E.:** Estadística, muestreo. **D.E.P.M.:** Diseño experimental, análisis de datos.

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Referencias

Abad, M. (2014). *Fitotoxicidad del material particulado sedimentable (MPS) generado en la zona urbana del cantón Cuenca.* Online: https://short-url.cc/1yHlV (Disponible en línea)

Alloway, B. J. (2013). *Heavy metals in soils: Trace metals and metalloids in soils and their bioavailability*. Springer. Online: https://short-url.cc/1taxP

BaLich, P., Anh Duc, T., Huy Thong, V., y Van Linh, N. (2024). Geochemical speciation, pollution assessment, and source identification of heavy metals in sediment cores of the Cau River basin, Hai Duong province, Vietnam. *RSC Sustainability*. Online: https://short-url.cc/1taxY

Bergametti, G., Formenti, P., Desboeufs, K., y Triquet, S. (2020). Trace elements in atmospheric aerosols: Sources and implications. *Elements*, 339–344.

Cesari, D., Contini, D., Genga, A., Siciliano, M., Elefante, C., Baglivi, F., y Daniele, L. (2012). Analysis of raw soils and their re-suspended PM10 fractions: Characterisation of source profiles and enrichment factors. *Applied Geochemistry*, *27*(6), 1238–1246. Online: https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2012.01.006

Dall'Osto, M., Beddows, D. C. S., Gietl, J. K., Olatunbosun, O. A., Yang, X., y Harrison, R. M. (2014). Characteristics of tyre dust in polluted air: Studies by single particle mass spectrometry (ATOFMS). *Atmospheric Environment*, *94*, 224–230. Online: https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.05.033

EMOV EP. (2021). *Informe de calidad del aire Cuenca 2020-2021* (Inf. Téc.). Cuenca, Ecuador: Empresa Pública de Movilidad, Tránsito y Transporte de Cuenca. Online: https://short-url.cc/1yHmj

Gobierno Autónomo Descentralizado (GAD) Municipal de Espíndola. (2015). *Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial de Espíndola 2014-2019* (Inf. Téc.). Espíndola, Loja, Ecuador: GAD Municipal de Espíndola. Online: https://short-url.cc/1yHmn

Guo, J., Li, X., Wang, Y., y Zhao, L. (2021). Adsorption of heavy metals onto soil minerals: A review of recent advances. *Journal of Hazardous Materials*.

Huang, L., Zhang, X., Meng, Y., Yu, Y., y Qi, M. (2022). Sources and formation mechanisms of heavy metals in road dust: A review. *Environmental Pollution*, *303*.

Iglesias, V., Carreras, H., Pongrac, C., Alvarez, L., y Mateos, A. (2012). Atmospheric lead deposition in the Argentine Pampas: Historical trends from c. 1995–2006 in a fast-developing agricultural region. *Environmental Pollution*, 140–147.

INEC. (2001). *Instituto Nacional de Estadística y Censos.* Online: https://goo.gl/iczP53

Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI). (2024). *Datos históricos meteorológicos.* Quito, Ecuador. Online: https://geoservicios.inamhi.gob.ec/#/

Intersociety Committee. (1988). *Methods of air sampling and analysis*. Lewis Publishers. Online: https://short-url.cc/1yHmu

Lara, R. (2022). *Material particulado en suspensión y depósitos en la zona oeste de la aglomeración de Gijón* (Tesis Doctoral, Universidad de Oviedo). Online: https://short-url.cc/1yHmz

López, J., Correa, J., Cano, Y., y Bermúdez, J. (2022). Evaluación de los gases de combustión y material particulado en el aire de parqueaderos del distrito metropolitano de Quito, Ecuador. *Revista Científica ECOCIENCIA*, *19*.

Mejía, D., Zegarra, R., Astudillo, A., y Moscoso, D. (2018). Análisis de partículas sedimentables y niveles de presión sonora en el área urbana y periférica de Cuenca. *Revista de la Facultad de Ciencias Químicas*, *19*.

Ministerio de Energía y Minas. (1998). *Acuerdo Ministerial No. 112: Autorización para la producción y comercialización a nivel nacional de gasolinas extra y súper sin plomo.* Registro Oficial No. 308 del 30 de abril de 1998. Quito, Ecuador.

Morales Tates, J., Morocho, L., Garzón, L., y Cepeda, M. (2024). Evaluación de la concentración de material particulado sedimentable en Fertisa Sur de Guayaquil. *Polo del Conocimiento*, *9*(3), 9–24. Online: https://doi.org/10.23887/pc.v9i3.6697

Morocho, D. (2024). Fuentes de contaminación atmosférica en zonas rurales. *Ciencia y Desarrollo Ambiental*, 27–39.

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Municipio del Distrito Metropolitano de Quito. (2015). *Informe de calidad del aire Quito* (Inf. Téc.). Quito, Ecuador: Dirección Metropolitana de Ambiente. Online: https://short-url.cc/1yHmE

Muñoz P., S., Salcedo R., J., y Sotomayor M., A. (2021). *Contaminación ambiental producida por el tránsito vehicular y sus efectos en la salud humana: revisión de literatura.* Online: https://goo.gl/abcd12

OPS. (2018). *Organización Panamericana de la Salud.* Online: https://short-url.cc/1yHmH

Pérez Cárdenas, A. (2017). Contaminación atmosférica: Una amenaza global. *Revista Internacional de Ciencias Ambientales*, 25–38.

Reyes, P., Morales, H., y Gómez, F. (2016). Impacto de los metales pesados en el ambiente y la salud humana. *Ciencia y Salud Ambiental*, 18–34.

Saeedi, M., Daneshvar, S., y Karbassi, A. (2015). Role of riverine sediment and particulate matter in adsorption of heavy metals. *International Journal of Environmental Science & Technology*. Online: https://www.bioline.org.br/pdf?st04017

Santillán, G., Rodríguez, M., Orozco, J., Paredes, M., Maldonado, C., y Rivadeneira, J. (2025). Determinación de la concentración de material particulado sedimentable en el barrio Juan Montalvo en el Cantón Riobamba. *TESLA Revista Científica*, *18*.

Santillán, P., Rodríguez, M., Orozco, J., Ríos, I., y Bayas, K. (2021). Evaluación de la concentración y distribución espacial de material particulado en los campus de la UNACH - Riobamba. *Scielo*. Online: https://short-url.cc/1yHmL (1 de diciembre)

Solórzano, P. (2023). *Monitoreo de material particulado sedimentable en la parroquia Coronel Marcelino Maridueña, provincia del Guayas durante el período 2023.* Online: https://short-url.cc/1yHmR

Suárez, L., y Vásquez, M. (2017). Composición y riesgos del material particulado. *Journal of Environmental Studies*, *10*(2), 56–67.

Tong, Y., Liu, X., y Zhang, Z. (2016). Status and phases of lead in typical garden soils from Beijing urban area. *Environmental Science and Pollution Research*.

Valdivieso, J., Coral, K., y Esteban, J. (2024). Determinación de la concentración de metales pesados mediante la caracterización de material particulado sedimentable en la reserva biológica Limoncocha, Ecuador. *Atena Editora*. Online: https://short-url.cc/1tayK (1 de abril)

Valencia, P., Sánchez, F., Tigua, M., y Mena, S. (2019). Cálculo referencial de material particulado en el aire como factor de contaminación en Pujilí. *Revista Científica Cienciamerica*, *8*(2), 15–24.

Villacis, O. (2023). *Plomo en material particulado sedimentable aledañas en terminales de transporte masivo, Guayaquil-Ecuador.* Online: https://short-url.cc/1tayN (Agosto)

Wang, F., Qiao, H., y Zhao, J. (2022). The influence of climatic variability on the resuspension and transport of sediment-bound heavy metals. *Environmental Research*.

Zegarra, R., Andrade, S., Parra, M., Mejía, D., y Rodas, C. (2020). Análisis espacial de PM10 en el aire y su composición de metales con relación a factores ambientales alrededor de centros de educación preescolar en Cuenca. *Maskana*. Online: https://short-url.cc/1yHn4 (29 de abril)

Zhang, Z., Chen, Y., y Xiao, H. (2020). High-efficiency solar evaporator prepared by one-step carbon nanotubes loading on cotton fabric toward water purification. *Science of the Total Environment*. Online: https://short-url.cc/1yHn9

Zhao, Y., Shao, M., y Zhang, Z. (2018). Heavy metals in agricultural soils from a typical mining region in China: Spatial distribution, risk assessment, and sources. *Ecotoxicology and Environmental Safety*.

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Normas para autores

El presente manual describe los pasos que deberá tener en cuenta para realizar un envío satisfactorio de su manuscrito. Tómese el tiempo necesario para leer cuidadosamente el presente documento.

1 Información general

«La Revista de Ciencias de la Vida, La Granja» es una publicación científica bilingüe de la Universidad Politécnica Salesiana de Ecuador, editada desde enero de 2002 de forma ininterrumpida, con periodicidad fija semestral, especializada en Ciencias de la Vida, Ambientales y sus líneas transdisciplinares como Ciencias de la Tierra, Biotecnología y Ciencias Agropecuarias, y Desarrollo Local Sostenible, entre otras.

Es una revista científica arbitrada, que utiliza el sistema de evaluación externa por expertos (*peer- review*), bajo metodología de pares ciegos (*doble-blind review*), conforme a las normas de citación del estilo Harvard. El cumplimiento de este sistema permite garantizar a los autores un proceso de revisión objetivo, imparcial y transparente, lo que facilita a la publicación su inclusión en bases de datos, repositorios e indexaciones internacionales de referencia.

«La Revista de Ciencias de la Vida, La Granja» se encuentra indexada en SCOPUS, en el Emerging Source Citation Index ESCI de la Web of Science, en el directorio y catálogo selectivo del Sistema Regional de Información en Línea para Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal (Latindex), en el Sistema de Información Científica REDALYC, en el Directorio de Revistas de Acceso Abierto DOAJ en el sistema de Clasificación Integrada de Revistas Científicas CIRC, en BaseSearch, la Máquina de Búsqueda Académica de *Bielefeld*, y en más de 42 repositorios, bibliotecas y catálogos especializados de Iberoamérica.

La revista se edita en doble versión: impresa (ISSN: 1390-3799) y electrónica (e-ISSN: 1390-8596), en español e inglés, siendo identificado además cada trabajo con un DOI (Digital Object Identifier System).

Todos los artículos son publicados para poder acceder a su contenido de manera abierta sin restricciones económicas, tanto en las fases de envío, revisión, publicación y traducción integrada de los manuscritos.

2 Alcance y política

2.1 Temática

Contribuciones originales en materia de Ciencias de la Vida, Ambientales y sus líneas transdisciplinares como Ciencias de la Tierra, Biotecnología y Ciencias Agropecuarias, y Desarrollo Local Sostenible y todas aquellas disciplinas conexas interdisciplinarmente con la línea temática central.

2.2 Aportaciones

«La Revista de Ciencias de la Vida, La Granja» edita preferentemente resultados de investigación empírica, teórica o experimental (*Scientific Articles*), redactados en español y/o inglés, siendo también admisibles selectas revisiones bibliográficas (*Reviews*).

Todos los trabajos deben ser originales, no haber sido publicados en ningún medio ni estar en proceso de arbitraje o publicación.

De esta manera, las aportaciones en la revista pueden ser:

a. Investigaciones Científicas (*Scientific Articles*):

5.000 a 6.500 palabras de texto, incluyendo título, resúmenes, introducción, materiales y métodos, resultados, conclusiones, tablas, figuras y referencias. Las referencias deberán estar citadas, ser actuales y selectivas de alrededor de unas 40 obras.

b. Revisiones (*Reviews*):

Máximo sugerido 7.000 palabras de texto, incluidas tablas y referencias. Se valorará especialmente las referencias justificadas, actuales y selectivas de alrededor de unas 50 obras.

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

«La Revista de Ciencias de la Vida, La Granja» tiene periodicidad semestral (20 artículos por año), publicada en los meses de marzo y septiembre.

2.3 Política económica abierta

«La Revista de Ciencias de la Vida, La Granja», es una revista abierta, donde todos los artículos son publicados para poder acceder a su contenido de manera abierta sin restricciones de contenido o económicas, tanto en el proceso de revisión como de publicación y traducción integra de los manuscritos. La revista es publicada por el Editorial Abya-Yala, en Quito, Ecuador.

2.4 Copyright

Las obras que se publican en «La Revista de Ciencias de la Vida, La Granja» están sujetas a los siguientes términos:

1. La Universidad Politécnica Salesiana (RUC: 0190151530001) conserva los derechos patrimoniales (copyright) de las obras publicadas, y favorece y permite la reutilización de las mismas bajo la licencia *Creative Commons* Reconocimiento-No-Comercial-Sin Obra Derivada 3.0 Ecuador, por lo cual se pueden copiar, usar, difundir, transmitir y exponer públicamente, siempre que:
    - Se cite la autoría y fuente original de su publicación (revista, editorial, URL y DOI de la obra).
    - No se usen para fines comerciales u onerosos.
    - Se mencione la existencia y especificaciones de esta licencia de uso.
2. La publicación otorgará a cada artículo un *Digital Object Identifier* (DOI). Ejemplo: Navarrete, Bernardo, Oswaldo Valarezo, Ernesto Cañarte y Ramón Solórzano. 2017. Efecto del nim (*Azadirachta indica Juss.*) sobre Bemisia tabaci Gennadius (*Hemiptera: Aleyrodidae*) y controladores biológicos en el cultivo del melón *Cucumis melo* L. La Granja: Revista de Ciencias de la Vida. Vol. 25(1):33-4. https://doi.org/10.17163/ret.n12.2016.05

2.5 Uso de inteligencia artificial (IA)

La Revista de Ciencias de la Vida, La Granja, permite el uso de herramientas de inteligencia artificial únicamente como apoyo en la redacción, edición lingüística, análisis estadístico o procesamiento de datos, siempre que dichas herramientas no sustituyan el juicio académico ni la autoría intelectual de los investigadores.

El uso de IA debe ser declarado de manera explícita y/o en el apartado de Metodología, si forma parte de la metodología científica de los resultados presentados. Se debe indicar la herramienta utilizada y el propósito de su aplicación. En todo momento, la aplicación de IA debe estar bajo supervisión humana, y la responsabilidad plena sobre el contenido, exactitud y originalidad del manuscrito recae exclusivamente en los autores. No se permite asignar autoría a sistemas de IA ni utilizarlos para generar resultados falsos, manipulados o sin verificación científica.

3 Presentación, estructura y envío de los manuscritos

Todos los autores han registrarse con sus créditos, filiaciones institucionales, país e identificador ORCID en la plataforma OJS; si bien sólo uno de ellos será el responsable de correspondencia. Ningún autor podrá enviar o tener en revisión dos manuscritos de forma simultánea, estimándose una carencia de un número consecutivo (1 año).

Cuando presente el artículo, usted no debe intentar diseñar el manuscrito, no justifique el documento, o centre los títulos, ni utilice el formato de doble columna. El único formato requerido es que los nombres en latín de los organismos deben estar en itálicas.

Los trabajos se presentarán en tipo de letra Arial número 10, interlineado doble (excepto para los títulos de tablas y figuras), justificado completo y sin tabuladores ni espacios en blanco entre párrafos. Todas las líneas deberán estar enumeradas de forma automática (Word>Diseño de pagina>Números de línea>continuo). Solo se separarán con un espacio en blanco los grandes bloques (título, autores, resumen, introducción, materiales y métodos, resultados, conclusiones y referencias).

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

La página debe tener 2 centímetros en todos sus márgenes (descargar "manuscrito anonimizado"). Los trabajos deben presentarse en documento de Microsoft Word (.doc o .docx) o LateX (.tex) que incluya las referencias en formato (.bib), siendo necesario que el archivo esté anonimizado en Propiedades de Archivo, de forma que no aparezca la identificación de autor/es.

Los manuscritos deben ser enviados única y exclusivamente a través del OJS (Open Journal System), en el cual todos los autores deben darse de alta previamente. No se aceptan originales enviados a través de correo electrónico u otra interfaz.

Por motivos de mejoramiento de la visibilidad e impacto de las publicaciones, todos los autores deben tener un número ORCID <https://orcid.org/>y se sugiere que al menos uno de los autores tenga una cuenta en Research Gate <https://www.researchgate.net/home>.

3.1 Estructura del manuscrito

Para aquellos trabajos que se traten de investigaciones científicas, los manuscritos seguirán la estructura IMRDC (Introducción, Materiales y Métodos, Resultados, Discusión y Conclusiones), cualquier uso de anexos se enviará como un documento aparte en Word o Latex y será catalogada como información complementaria (descargar "manuscrito anonimizado").

Los trabajos que se traten de Revisiones Bibliográficas, podrán ser más flexibles en sus epígrafes, especialmente en Materiales y Métodos, Resultados y Discusión. En todas las tipologías de trabajos son obligatorias las Referencias que en lo posible deberán incluir un link electronico de referencia. En cualquier caso los documentos constarán de las siguientes secciones:

a. Título (español) / *Title* (inglés):

Conciso pero informativo, en castellano en primera línea y en inglés en segunda. Se aceptan como máximo 25 palabras con espacios incluidos. El título no solo es responsabilidad de los autores, pudiéndose proponer cambios por parte del Consejo Editorial.

Es necesario escribirlo en mayúsculas y minúsculas, centrado; si contiene nombres científicos de taxa, destacarlos con cursivas, sin el autor del taxón.

b. Nombres y filiación de los autores:

Nombre(s) y Apellido(s) de cada uno de los autores, organizados por orden de prelación. Junto a los nombres ha de seguir centro de trabajo, dirección, ciudad, país, correo electrónico de cada autor y número de ORCID. Adicionalmente se debe incluir qué autor será el responsable del manuscrito o autor por correspondencia, señalándolo con un asterisco (*). Dicha información será únicamente presentada en el archivo modelo denominado "presentación-portada" (descargar "presentación-portada")

c. Resumen (español) / *Abstract* (inglés):

Tendrá como extensión máxima 250 palabras, primero en español y después en inglés. En el resumen se describirá de forma concisa implícita o explícitamente y en este orden: Justificación del tema; Objetivos; Metodología y muestra; Principales resultados; Principales conclusiones. Ha de estar escrito de manera impersonal "El presente trabajo analiza...". En el caso del abstract no emplee traductores automáticos, tome el debido cuidado al traducir su resumen, es la primera impresión que tendrá el revisor.

d. Palabras clave (español) / *Keywords* (inglés):

Se deben exponer de 4 a 6 descriptores por cada versión idiomática relacionados directamente con el tema del trabajo. Trate de no repetir las mismas palabras del título. Deben colocarse tanto en español, como en inglés.

e. Introducción:

Se sugiere utilizar el sistema SPPR Situación (Estado del Arte), Problema, Pregunta (Hipótesis del Estudio) y Respuesta (Objetivo del Estudio). De esta manera, se debe exponer de manera clara y con suficientes referencias bibliográficas el estado del arte actualizado de su estudio, el planteamiento del problema, el contexto de la problemática, la justificación, fundamentos y propósito del estudio, utilizando la literatura más significativa y actual del tema.

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

f. Materiales y métodos:

Deben ser redactados de forma que el lector pueda comprender con facilidad el desarrollo de la investigación. Describirá cronológicamente la metodología, la muestra y la forma de muestreo, así como se hará referencia al tipo de análisis estadístico empleado. Asegurando en todo momento la replicabilidad de su experimento explicando el diseño experimental, equipos de laboratorio utilizados y programas computacionales, entre otros. En toda metodología utilizada, es necesario exponer las razones que han conducido a su empleo y describir sus posibles limitaciones.

g. Resultados y Discusión:

Se procurará resaltar las observaciones más importantes. Debe incluir la información cuantitativa o cualitativa que sustentará las conclusiones finales. Aparecerán en una secuencia lógica en el texto y las Tablas, Figuras y ecuaciones imprescindibles evitando la duplicidad de datos. Toda tabla, figura o ecuación deberá estar citada en el texto y enumerada secuencialmente.

Para el caso de las ecuaciones, emplee el editor de ecuaciones de Word o mediante programación en Latex, coloque de manera consecutiva las ecuaciones ordenándolas mediante un número encerrado entre paréntesis (1), para mejor compresión vea el documento "manuscrito anónimizado".

Las fotos, ilustraciones y gráficas únicamente se presentan como figuras, y éstas, al igual que las tablas, deben incluir una descripción explicativa para cada una, ver manuscrito anónimizado.

En el texto, toda tabla y figura deben ser nombradas, analizadas y discutidas resaltando los hallazgos más representativos y/o limitaciones del estudio. Cite dentro del texto Figura 6 o Tabla 1, por ejemplo. No abrevie la palabra figura o tabla.

Las figuras pueden ser dibujos lineales, mapas, o fotografías de medios tonos en blanco y negro o a color en resolución de 300 dpi, es decir el tamaño de la figura debe ser grande, apropiado para la publicación en formato de calidad. Cada figura debe ser adjuntada con el envío en formato TIFF,PNG o JPG enumeradas en el orden de aparición. Los autores deberán tomar en cuenta que las leyendas y ejes de las figuras deben ser perfectamente legibles tanto al ampliar como reducir la figura.

Diseñe las figuras para que se ajusten eventualmente al tamaño final de la revista 19,2 × 26,2 cm. Asegúrese de que las inscripciones o detalles, así como las líneas, tengan tamaños y grosores adecuados de tal manera que no queden ilegibles cuando sean reducidos a su tamaño final (números, letras y símbolos deben ser reducidos al menos a 2,5 mm de altura después que las ilustraciones han sido reducidas para ajustarse a la página impresa). Idealmente, las ilustraciones lineales deben ser preparadas a aproximadamente a un cuarto de su tamaño final de publicación, ejemplo: 4, 7 × 6, 5 cm.

Diferentes elementos en la misma figura deben ser deletreados a, b, c, d, etcétera. Las fotografías deben gravarse con alto contraste y en alta resolución. Recuerde que las fotografías frecuentemente pierden contraste en el proceso de impresión.

Si las figuras han sido previamente usadas, es de responsabilidad única del autor el obtener el/los permisos correspondientes. Evite problemas posteriores relacionados con los derechos de autor.

h. Conclusiones y Discusión:

El apartado de Discusiones puede aparecer en los Resultados o en las Conclusiones, a preferencia del autor. Las Conclusiones resumirán los hallazgos más importantes, relacionando las propias observaciones con estudios de interés, señalando aportaciones y limitaciones, sin redundar datos ya comentados en otros apartados. Asimismo, el apartado de discusión y conclusiones debe incluir las implicaciones y líneas para futuras investigaciones.

i. Agradecimientos (opcionales):

El *Council Science Editors* recomienda a los autor/es especificar la fuente de financiación de la investigación. Se considerarán prioritarios los trabajos con aval de proyectos competitivos nacionales e internacionales. En todo caso, para la valoración científica del manuscrito, este debe ir anonimizado con XXXX solo para su evaluación inicial, a fin de no identificar autores y equipos de investigación, que deben ser explicitados en la Carta de Presentación y posteriormente en el manuscrito final.

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

j. Referencias:

Las citas bibliográficas deben reseñarse en forma de referencias al texto. Bajo ningún caso deben incluirse referencias no citadas en el texto, ni tampoco deben ser incluidas citas solamente en el texto sin contener su respectiva referencia. Su número debe ser suficiente para contextualizar el marco teórico con criterios de actualidad e importancia.

Se presentarán alfabéticamente por el primer apellido del autor, siguiendo el estilo Harvard, que se describe a continuación y/o que se puede presentar con el gestor de citas del procesador de texto utilizado.

3.2 Normas para las referencias

3.2.1 Como se cita en el texto

Harvard es un estilo de citación que permite colocar los dos apellidos del autor (muchas veces éstos aparecen separados con un guión), si es que los presenta. Caso contrario se utiliza un solo apellido, como es usual en la tradición anglosajona.

Un autor: Samaniego (2012); (Samaniego, 2012); Valdés-Pérez (2016); (Valdés-Pérez, 2016); (Valdés Pérez, 2016); Valdés Pérez (2016).

Hasta tres autores: Samaniego, Vásquez y Torres (2010); (Samaniego, Vásquez y Torres, 2010).

Más de tres autores: Samaniego *et al*. (2010); (Samaniego *et al*., 2010)

3.2.2 Referencias

a. Artículo de revista (incluir siempre el DOI del artículo o en lo posible la dirección electrónica URL del artículo):

Arnold, M. y Osorio, F. (1998) Introducción a los Conceptos Básicos de la Teoría General del Sistemas. Revista Cinta de Moebio [en línea], (3). Universidad de Chile. Disponible en <https://goo.gl/FwjAqo>[consulta: 20 enero 2005].

Dhillon, B. (2004) Should Doctors Wear Ties? Medical Monthly [en línea], 3 (1), 55-88. Disponible en <https://goo.gl/pHzUxJ>[consulta: 20 abril 2006].

b. Libros completos:

Un Autor:
Holt, DH 1997, Management principles and practices, Prentice Hall, Sydney.

Dos Autores:
McCarthy, EJ, William, DP & Pascale, GQ 1997, Basic marketing, Irwin, Sydney.

Tres o más autores:
Bond, WR, Smith, JT, Brown, KL & George, M 1996, Management of small firms, McGraw-Hill, Sydney.

c. Medios electrónicos:

Reed, S 2015, 'Shift to lower-carbon energy is too slow, report warns', New York Times, 9 November. Available from: https://goo.gl/iczP53. [10 November 2015].

Es prescriptivo que todas las citas que cuenten con DOI (Digital Object Identifier System) estén reflejadas en las Referencias (pueden obtenerse en https://goo.gl/gfruh1). Todas las revistas y libros que no tengan DOI deben aparecer con su link (en su versión online, en caso de que la tengan, acortada, mediante Google Shortener: https://goo.gl

Los artículos de revistas deben ser expuestos en idioma inglés, a excepción de aquellos que se encuentren en su idioma de origen, caso en el que se expondrá en ambos idiomas utilizando corchetes.

Todas las direcciones web que se presenten tienen que ser acortadas en el manuscrito, a excepción de los DOI que deben ir en el formato indicado (https://doi.org/XXX).

3.3 Epígrafes

Los epígrafes del cuerpo del artículo se numerarán en arábigo. Irán sin caja completa de mayúsculas, ni subrayados, ni negritas. La numeración ha de ser como máximo de tres niveles: 1. / 1.1. / 1.1.1.

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Al final de cada epígrafe numerado se establecerá un espacio.

4 Proceso de envío

Deben remitirse a través del sistema OJS previo registro en la dirección <https://revistas.ups.edu.ec/index.php/granja/user/register>de la revista, los siguientes archivos:

Archivo N°1: Cover Letter, Cesión de derechos y declaración de conflictos de interés:
Descargue el modelo "cover letter".

Archivo N°2: Presentación-portada:
Este archivo (Word o Latex), contendrá tres apartados claramente identificables:

a) Título en español e inglés, nombres y apellidos de los autores de forma estandarizada con número de ORCID, filiación y grado académico.

b) Resumen, abstract, palabras claves y keywords.

c) Una declaración de que el manuscrito se trata de una aportación original, no enviada ni en proceso de evaluación en otra revista, confirmación de las autorías firmantes, aceptación (si procede) de cambios formales en el manuscrito conforme a las normas y cesión parcial de derechos a la editorial (descargar "presentación-portada").

Archivo N°3: Manuscrito totalmente anonimizado, conforme a las normas referidas en precedencia.

Archivo N°4: El autor de correspondencia deberá presentar una lista de 5 potenciales revisores del artículo que cumplan los siguientes criterios (descargar modelo "evaluadores sugeridos"):

- No ser del mismo país del autor de correspondencia. Por ejemplo, si el autor de correspondencia trabaja en Brasil, el revisor propuesto NO puede estar vinculado a instituciones del mismo país del autor de correspondencia, es decir, "Brasil").

El formato de este archivo podrá realizarse en cualquier procesador de texto Word / LateX y se deberá aportar de cada potencial revisor la siguiente información:

- Nombres y Apellidos
- Filiación
- Grado académico
- Correo electrónico
- Código Orcid correspondiente

Indicar brevemente la pertinencia de dicho revisor para la evaluación del manuscrito

El no cumplimiento de algunas de los requisitos de la presente normativa
podrá ser causal de rechazo AUTOMATICO del manuscrito.
Tome el debido tiempo para completar de manera correcta el proceso de envío.

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

LA GRANJA:
REVISTA DE CIENCIAS DE LA VIDA

NÚMERO ESPECIAL
Quiralidad a diferentes escalas



"Geometrías de la vida"

En esta fotografía se buscó capturar la geometría que emerge de manera natural en los seres vivos. Las alas de las mariposas revelan patrones, líneas, colores y formas que parecen repetirse y reflejarse, pero que, al observarlas con detenimiento, muestran pequeñas diferencias. Cada individuo ocupa una posición y una orientación propias dentro de la escena. La imagen invita así a mirar la vida desde su organización espacial: entre simetrías y asimetrías, semejanzas y diferencias, orden y variación. En el contexto de la quiralidad, estas mariposas se convierten en una metáfora visual de una característica fundamental de la naturaleza: la geometría no es solamente forma, sino también orientación, relación y organización.

Autor: ©Jonathan González Chuqui (2026)

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA DEL ECUADOR
Juan Cárdenas Tapia, sdb
Rector

©Universidad Politécnica Salesiana
Turuhuayco 3-69 y Calle Vieja, Cuenca, Ecuador
Teléfono: (+593 7) 205 00 00 Fax: (+593 7) 408 89 58 Casilla postal 2074
Correo electrónico: srector@ups.edu.ec
Web: www.ups.edu.ec

Fortalezas

La Granja, Revista de Ciencias de la Vida es la primera revista científica del Ecuador que aborda las temáticas de Ciencias Ambientales, de la Tierra y sus líneas transdisciplinares como Biotecnología, Ciencias Agropecuarias y Desarrollo Rural Sostenible, entre otras. Publicada por la Universidad Politécnica Salesiana en doble formato: impreso y on-line con periodicidad semestral, todos sus artículos se presentan en español e inglés. 24 años de edición y 320 artículos científicos publicados; editada por Abya-Yala con más de 48 años de experiencia en Ecuador.

La Granja tiene presencia en 96 bases de datos internacionales, plataformas de evaluación de revistas, directorios selectivos, portales especializados, catálogos hemerográficos, como: SCOPUS, ESCI, Emerging Sources Citation Index ESCI de la Web of Science, MIAR, EBSCO, LATINDEX, DOAJ, REDIB, DIALNET, REDALYC, BASE, entre otros.

Trabaja con un riguroso y transparente sistema peer review doble ciego de evaluación de manuscritos, sin costo, realizado por un consejo de revisión con 280 reconocidos investigadores de países de todo el mundo.

La administración de manuscritos se realiza a través del Sistema OJS 3, de la Fundación de Ciencia y Tecnología, con compromisos éticos publicados para la comunidad científica de transparencia y puntualidad; revisión de antiplagio realizada a través de Ithenticat y Similarity Check.

Alto nivel de visibilización con múltiples sistemas de búsqueda, DOI, ORCID, PDF dinámicos, xml jats, epub, con conexión a gestores documentales como Mendeley, RefWorks, EndNote y redes sociales científicas como Academia.edu y ResearchGate. Accesible digitalmente a texto completo, de forma gratuita, para toda la comunidad científica e investigadores de todo el mundo en apoyo a la política de Open Access y Early Access.

