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. 23 años de edición y 300 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, CIRC, 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.

Proceso de evaluación por pares

Todos los manuscritos deben ser consignados a través del sistema Open Journal System (OJS 3), que garantiza el registro electrónico y auditable de las interacciones entre la publicación y los autores. Una vez consignados, el Consejo de Editores revisa que los originales cumplan con el objetivo y alcance de la publicación, así como con las normas de autores.

El proceso de revisión íntegro, desde el momento del depósito de los manuscritos a través del OJS 3 hasta la finalización de las revisiones ocupa un tiempo medio de 12-16 semanas, salvo incidencias. Los revisores, a su vez, también deben cumplir unas normativas de revisores y el código ético de revisores.

Antiplagio

Todos los manuscritos sometidos a revisión en La Granja Revista de Ciencias de la Vida, son inspeccionados por una disciplinada política antiplagio que vela por la originalidad de los artículos. Para ello se utilizan distintos servicios especiales como el sistema Ithenticate, que analiza los textos en busca de coincidencias gramaticales y ortotipográficas, lo que garantiza que los trabajos sean inéditos y asegura cumplir con los estándares de calidad editorial que avalen producción científica propia.

Asimismo, La Granja pone a disposición de autores y revisores, así como de la comunidad científica, un conjunto de herramientas específicas en la detección del plagio: Turnitin, Grammarly, Plagium, Copionic, WriteCheck PaperRater, Plagarisma.net, Viper Plagarism Scanner y Similarity (CrossCheck). Se trata de un conjunto de interfaces de libre acceso y de pago, que supervisan la originalidad de cualquier manuscrito y permiten controlar el plagio.

ABYA YALA
SALESIANOS DON BOSCO
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA ECUADOR
30 AÑOS TRANSFORMANDO VIDAS

LA GRANJA
REVISTA DE CIENCIAS DE LA VIDA

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

LA GRANJA 39

REVISTA DE CIENCIAS DE LA VIDA Vol. (1)

NÚMERO ESPECIAL

DESARROLLO SUSTENTABLE

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

MISCELÁNEOS

La etnoeducación como instrumento para la promoción del desarrollo sustentable

Actitudes y prácticas ambientales de la población urbana de Puno, altiplano andino

Efectos de las regulaciones medioambientales en la eco-innovación y el rendimiento sustentable en la industria automotriz mexicana

Retroceso del glaciar del Carihuairazo y sus implicaciones en la comunidad de Cunucyacu

Determinación molecular del agente etiológico de la mastitis bovina de muestras andinas

LA GRANJA REVISTA DE CIENCIAS DE LA VIDA

La Granja Revista de Ciencias de la Vida • Volumen 39 • Número 1 • marzo 2024 - agosto 2024. 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.

EQUIPO EDITORIAL

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 en Sustentabilidad Organizacional, Desarrollo y Gestión Ambiental (Guest editors of the special issue of Organizational Sustainability, Development, and Environmental Management)
Dr. Lisandro José Alvarado-Peña, Universidad del Zuila, Venezuela (EDITOR INVITADO PRINCIPAL)
Dra. Gabriela Citlalli Lopez-Torres, Universidad Autónoma de Aguascalientes, México
Dr. Jean Bonnet, Universidad de Caen Normandía, Francia
Dr. Jorge Marx Gómez , Universidad de Oldenburg, Alemania

Editores de sección (Section Editors)

Ciencias de la Tierra (Earth sciences)
Dr. Thomas Condom, Institut de Recherche Pour Le Développement, Francia
Dr. Christian Domínguez, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador
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. Laura Huachi, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador

Ciencias Biológicas, Biotecnológicas, Químicas y afines (Biological, Biotechnological, Chemical and related Sciences)
Dr. Paco Noriega, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador
Dr. Sabino Armenise, Cepsa - Centro de Investigación, España
Dr. Fabián Bersosa, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador
Dr. Rómulo Salazar, Escuela Superior Politécnica del Litoral, ESPOL, Ecuador

Ciencias Ambientales (Environmental Sciences)
Dr. Guillermo Marcillo, University of Illinois Urbana Champaign, EEUU
PhD. César Iván Álvarez, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador
Dra. Ximena Borja, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador

Ciencias de Alimentos (Food Sciences)
Dr. Rómulo Salazar, Escuela Superior Politécnica del Litoral, ESPOL, Ecuador
Dr. Fabiola Cornejo, Escuela Superior Politécnica del Litoral, ESPOL, Ecuador.
Dr. María Corradini, University of Guelph, Canadá

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. Juan Pablo Salgado 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

MSc. 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)
Fís. Luis Gualco (Maquetador)
Ing. Mariana Luna (Asistente editorial)
Dr. Danny Vargas (Editor Asistente)

Servicio de Publicaciones (Publications Service)

Hernán Hermosa (Coordinación General)
Marco Gutiérrez (Soporte OJS)
Paulina Torres (Edición)
Raysa Andrade (Maquetación)
Martha Vinueza (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

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 39, Número 1, marzo 2024 – agosto 2024

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

Scopus®

INDEXED IN EMERGING SOURCES CITATION INDEX CLARIVATE ANALYTICS

SciELO

Google scholar

EuroPub Directory of Academic and Scientific Journals

BASE

trueserials.com

Fuente Académica Plus EBSCOhost

SIIA

PLATAFORMAS DE EVALUACIÓN DE REVISTAS

MIAR

CABELLS SCHOLARLY ANALYTICS

DIRECTORIOS SELECTIVOS

latindex

Journal Seeker Research Bible

AcademicKeys UNLOCKING ACADEMIC CAREERS

HEMEROTECAS SELECTIVAS

redalyc.org

refseek*

REDIB Red Iberoamericana de Innovación y Conocimiento Científico

BUSCADORES DE LITERATURA CIENTÍFICA OPEN ACCESS

DOAJ DIRECTORY OF OPEN ACCESS JOURNALS

EXALEAD

WORLDWIDESCIENCE.ORG The Global Science Gateway

Políticas de Copyright de las Editoriales y Autoarchivo

SHERPA/RoMEO

Otras Bases de Datos Bibliográficas

Dialnet

Journal TOCs
The latest Journal Tables of Contents

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 1923 1904 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

La granjA:
Revista de Ciencias de la Vida

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. 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
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

Índice

Editorial 7

Artículos Científicos

Número especial: Desarrollo Sostenible

La Etnoeducación como instrumento para la promoción del desarrollo sustentable. Un análisis desde la cienciometría 11
Hugo Alexánder Semanate Quiñonez y Ciro Alfonso Serna Mendoza.

Disposición a pagar por un sistema integral de residuos sólidos urbanos en poblaciones semi-urbanas 27
Francisco Iván Hernández Cuevas, Diana Estefania Castillo Loeza, Javier Becerril García y María Pía Mc Manus Gómez.

Actitudes y prácticas ambientales de la población urbana de Puno, Altiplano Andino 43
Jesús Evaristo Tumi Quispe.

Una perspectiva del desarrollo hidroeléctrico en Ecuador: pasado, presente y futuro 63
Sebastian Naranjo-Silva.

Efectos de las regulaciones medioambientales en la eco-innovación y el rendimiento sustentable en la industria automotriz mexicana 78
Gonzalo Maldonado-Guzmán, Víctor Manuel Molina-Morejón y Raymundo Juárez-del Toro.

Ciencias de la Tierra

Retroceso del glaciar del Carihuairazo y sus implicaciones en la comunidad de Cunucyacu 92
David Hidalgo, Christian Domínguez, Marcos Villacís, Jean-Carlos Ruíz, Luis Maisincho, Bolívar Cáceres, Verónica Crespo-Pérez, Thomas Condom y David Piedra.

Análisis de susceptibilidad a deslizamientos empleando el proceso de jerarquía analítica en una carretera amazónica del Ecuador 116
Cristian J. Cargua, Ronny Espin, Bryan G. Valencia, Marco Simbaña, Sebastián Araujo, Carolina Cornejo y Anderson Ocampos.

Ciencias Veterinarias

Determinación molecular del agente etiológico de la mastitis bovina de muestras provenientes de unidades productoras andinas 137
Nancy Bonifaz, Ximena Galarza, Byron Fuertes y Janss Beltrán.

Biotecnología

Respuesta del maíz harinoso (*Zea mays L. var. Amylacea*) a la inoculación de *Azospirillum* y *Pseudomonas* 150
Carlos Sangoquiza-Caiza, Jose Zambrano-Mendoza, Misterbino Borgues-García y Kang J. Cho.

Ciencias Agricolas

Efecto de la densidad de plantas sobre los componentes del rendimiento de fréjol cultivado en condiciones de campo en un valle interandino de Ecuador 160
Santiago C. Vásquez, Edwin Israel Villavicencio Sanchez, Alex O. Guamán, Marlene Molina-Müller y Camilo Alexander Mestanza Uquillas.

Normas para autores 171

La granja:
Revista de
Ciencias de la Vida
pISSN:1390-3799; eISSN:1390-8596

Estimadas y estimados lectores:

Cuando hablamos de sustentabilidad nos referimos a una serie de aspectos que desde hace unas cuatro décadas aproximadamente han pasado a ser elementos clave para la planificación del desarrollo en todos los ámbitos a nivel mundial. Es así que, la sostenibilidad (Europa) o sustentabilidad (América), es un paradigma vigente que debe ser considerado por todos y en todos los sectores, ya que conlleva a establecer un equilibrio entre lo económico, lo social y lo ambiental, a la hora de poner el tema del desarrollo de los pueblos sobre la mesa.

Desde sus inicios, se han hecho distinciones al referirse a una u otra terminología, sin embargo, ambos usos son ciertamente válidos, según reza en la literatura existente, ya que las dos conforman un concepto acuñado en 1987 por la Dra. G H, Brundtland, (encargada de la Organización de Naciones Unidas - ONU), como "Desarrollo sustentable" (en otros textos también se menciona como "desarrollo sustentable"), en el informe titulado: "Nuestro futuro común"; tal expresión engloba a la economía, el medio ambiente y a la sociedad como una trilogía interdependiente, siendo el "medio ambiente" el pilar determinante para la toma de decisiones (Gobierno de México, 2018).

Ahora bien, durante estas décadas, la sustentabilidad ha venido evolucionando en su comprensión teórica, y ha sido objeto de análisis basados en perspectivas que sopesan la existencia de hechos y circunstancias, que por no ser atendidas o prevenidas no se concebían como reales, hasta que se evidenciaron las consecuencias que acarreó tal desatención; estas consecuencias se presentan en cualquier ámbito, pero sin lugar a dudas suelen ser muy peligrosas cuando se omiten por parte de los gobiernos:

"…omitir el tema del desarrollo sustentable en los programas y planes estratégicos de los sistemas de gobierno implica el gasto, uso y abuso excesivo de los recursos ambientales que se encuentran a disposición, para la supervivencia de los seres vivos; por lo tanto, a medida que aumenta la demanda de productos y servicios para cubrir y satisfacer las necesidades vitales y comunes del colectivo, acompañado del estilo de vida que se eleva cada vez más, en las grandes metrópolis y diferentes estratos de la sociedad, se observa cómo se va alterando y afectando la longevidad de los seres humanos (Alvarado-Peña y Hoz, 2020, p. 14)."

En teoría y haciendo uso correcto del concepto y las dos terminologías en las empresas u organizaciones en América Latina, hoy día se está asimilando y entendiendo, más que en el pasado, que las prácticas sustentables y sostenibles traen consigo un conjunto de beneficios, tanto para la propia empresa (aumentando y mejorando su valor, rendimiento, finanzas), como el enorme impacto económico y social para todas las partes, por lo que el fin siempre ha de ser plantear y fortalecer los objetivos dirigidos al cuidado del ambiente.

Sin embargo, en la práctica este desarrollo sustentable es un aspecto que ha tenido poca trascendencia, aún en la época actual, principalmente en aquellas organizaciones donde sus recursos, las actividades que realizan, su producción y servicios se basa en la explotación del medio ambiente; las organizaciones que inevitablemente van en un camino contrario al desarrollo sustentable "son una amenaza evidente para la naturaleza… pero también para el hombre que coexiste con esta" (Alvarado-Peña y Hoz, 2020, p. 14).

Por lo antes planteado, la razón de ser de esta obra atiende a las exigencias del entorno, en cuanto a generación de conocimiento y producción científica, y por supuesto la divulgación de trabajos de investigación en el área social, que en definitiva emitan los resultados necesarios para la resolución de las diversas problemáticas existentes.

El trabajo investigativo en la temática del desarrollo sustentable, especialmente en los contextos de los países en desarrollo de la región, es una prioridad y un motivo propicio para presentar algunos documentos, producto de la inquietud e interés de los investigadores por difundir información que precisamente aporte un granito de arena a la solución de situaciones inherentes a la promoción y fortalecimiento de la sustentabilidad en las organizaciones desde los diferentes campos del conocimiento. En torno a lo antes expresado, a continuación presentamos los diferentes artículos científicos, sus títulos, autores y una breve descripción de su contenido:

LA ETNOEDUCACIÓN COMO INSTRUMENTO PARA LA PROMOCIÓN DEL DESARROLLO SUSTENTABLE. UN ANÁLISIS DESDE LA CIENCIOMETRÍA

Presentado por Hugo Semanate Quiñonez y Ciro Serna Mendoza, investigadores de la Universidad de Manizales

La Granja: *Revista de Ciencias de la Vida* 39(1) 2024:7-10.
©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

y el Servicio Nacional de Aprendizaje SENA, de Colombia. Este estudio contiene una completa revisión literaria sobre las publicaciones más citadas de los años 2017 a 2021, en torno a un análisis sobre la etnoeducación, aportes y promoción del "desarrollo sustentable" desde el acto pedagógico de los Pueblos Originarios; obteniéndose como resultado una evolución de la producción científica de 1.124 documentos científicos anuales, con tópicos relacionados a pedagogía, docencia, cultura, y conocimientos ancestrales de autores destacados. Concluyen sus autores que los procesos educativos en las comunidades étnicas surgen a partir de las prácticas ancestrales, lo que impulsa la sustentabilidad, permitiendo educar al "ser", sin adaptarlo a doctrinas y modelos educativos desarrollistas.

DISPOSICIÓN A PAGAR POR UN SISTEMA INTEGRAL DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS EN POBLACIONES SEMI-URBANAS

Los investigadores Francisco Iván, Hernández Cuevas; Diana Estefanía Castillo Loeza; Javier Becerril García, y María Pía Mc Manus Gómez, de la Universidad Autónoma de Yucatán y la Universidad Marista de Mérida de México, presentan un estudio entre pocos, como bien lo han expresado sus autores, cuyo objetivo fue: "determinar los factores socioeconómicos asociados a la disposición a pagar por el MIRSU (Manejo Integral de los Residuos Sólidos Urbanos), de los usuarios de municipios semiurbanos de Yucatán (Mérida-México)". El estudio se realizó a través de 1.144 encuestas aplicadas en 6 localidades semiurbanas de Yucatán, donde se obtuvieron como resultado declaraciones por parte de los usuarios encuestados de estar dispuestos a pagar un monto promedio de 17,65 pesos, por el manejo integral de los residuos sólidos; se observó que la disposición a pagar disminuye cuando predomina el idioma maya, y mientras menos activos físicos y habitaciones tenga el hogar. Se concluye, entre otros aspectos, que hay elementos culturales y sociales arraigados en este comportamiento.

ACTITUDES Y PRÁCTICAS AMBIENTALES DE LA POBLACIÓN URBANA DE PUNO, ALTIPLANO ANDINO

Presentado por Jesús Evaristo Tumi Quispe, de la Universidad Nacional del Altiplano Puno de Perú. Tiene como objetivo caracterizar las actitudes y comportamientos proambientales de la población de la ciudad de Puno en relación al saneamiento, la contaminación y la gestión ambiental. Este estudio no experimental fue aplicado en una población de 97.264 habitantes mayores de 18 años del área urbana; como resultado se obtuvo, que las actitudes ambientales de la mayoría de los pobladores son positivas respecto a los factores y fuentes de contaminación, y sus efectos en la salud humana. Los autores concluyen que se requieren nuevas políticas públicas en educación ambiental para incorporar efectivamente a la sociedad civil, con base a un sistema de incentivos.

UNA PERSPECTIVA DEL DESARROLLO HIDROELÉCTRICO EN ECUADOR: PASADO, PRESENTE Y FUTURO

El investigador Sebastián Naranjo Silva, de la Universidad Politécnica de Cataluña de España, nos presenta la siguiente investigación que tiene como objetivo analizar críticamente el desarrollo de la energía hidroeléctrica en Ecuador en los últimos años y establecer proyecciones energéticas generales al 2030 para ampliar los campos de conocimiento y perspectivas. Con una metodología cuantitativa, se obtuvo de fuentes editoriales científicas, artículos, documentos de investigación, y bases de datos de agencias gubernamentales todo lo concerniente al desarrollo hidroeléctrico de Ecuador, y sus regulaciones. Como resultado se infiere mediante un cálculo de proyecciones, que Ecuador necesitará para el año 2030 alrededor de 43 TWh, 47 TWh o 52 Se concluye que la energía hidroeléctrica será fundamental para contribuir a este requerimiento, existiendo una barrera como país, ya que la energía hidroeléctrica es muy sensible a factores externos (efectos climáticos) lo que genera un futuro incierto.

LOS EFECTOS DE LAS REGULACIONES MEDIOAMBIENTALES EN LA ECO-INNOVACIÓN Y EL RENDIMIENTO SUSTENTABLE EN LA EMPRESA DE LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ DE MÉXICO

Por Gonzalo Maldonado Guzmán; Víctor Molina Morejón y Raymundo Juárez del Toro; investigadores de la Universidad Autónoma de Aguascalientes y la Universidad Autónoma de Coahuila de México. Los autores de este estudio indicaron la existencia de literatura que habla de cómo el cumplimiento de las regulaciones medioambientales propicia la implementación de actividades de eco-innovación en las empresas manufactureras, pero poco se sabe de la relación entre las regulaciones medioambientales, la eco-innovación y el rendimiento sustentable, ya que según indican, son pocos los estudios publicados; por lo que se plantearon como objetivo: llenar este vacío existente, y generar nuevo conocimiento de la relación entre estos tres constructos a través de una extensa revisión de la literatura. Luego del análisis de los datos arrojados por una muestra de 460 empresas manufactureras de México, obtuvieron como resultado que tales regulaciones tienen efectos positivos en la eco-innovación, y esta a su vez tiene efectos positivos en el rendimiento sustentable de las empresas manufactureras de la industria automotriz. De igual forma, concluyen que el cumplimiento de las regulaciones producen mejorías en las actividades de eco-innovación.

La Granja: *Revista de Ciencias de la Vida* 39(1) 2024:7-10.
©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Como comentario en relación a los estudios antes mencionados, las acciones en investigación científica sobre SUSTENTABILIDAD ORGANIZACIONAL, son investigaciones muy complejas que requieren del esfuerzo, iniciativa, alianzas, y todo tipo de relaciones interinstitucionales, por lo que es importante reconocer la labor que desempeñan los investigadores en esta área, quienes aportan información valiosa para la comprensión del lector en general, a la vez que se divulga conocimiento nuevo, se construyen antecedentes y bases para estudios posteriores, lo que ya es ganancia.

Por otro lado, al ser La Granja una revista miscelánea de Ciencias de la Vida, presenta también artículos en diversas temáticas, en este caso en Ciencias de la Tierra, Ciencias Veterinarias y Agropecuarias, los cuales presentamos a continuación:

RETROCESO DEL GLACIAR DEL CARIHUAIRAZO Y SUS IMPLICACIONES EN LA COMUNIDAD DE CUNUCYACU

En esta investigación realizada por David Hidalgo, Jean-Carlos Ruíz, Luis Maisincho, Bolívar Cáceres, Verónica Crespo, Christian Domínguez, David Piedra y Marcos Villacís investigadores del IRD (Institut de Recherche pour le Développement) la Universidad de Sorbona, la Universidad de Grenoble, de Francia; la Universidad Politécnica Salesiana, la Escuela Politécnica Nacional, la Universidad Andina Simón Bolívar y el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología de Ecuador, se analiza el retroceso de los glaciares en la cordillera de los Andes, enfocándose en la pérdida lamentable de la masa de hielo remanente en el Carihuairazo, el cual para el año 2021 pierde el 99 % de su superficie glaciar total. En este completo artículo se analizan no sólo datos meteorológicos y climatológicos, sino también imágenes satelitales contrastándolas con entrevistas a los miembros de la comunidad aledaña de Cunucyacu y a andinistas que trabajan y frecuentan la zona. De esta manera, se muestra cómo el glaciar Carihuairazo se encuentra en una situación de inevitable desaparición y se revelan las vulnerabilidades de las comunidades que se enfrentan a este fenómeno.

ANÁLISIS DE SUSCEPTIBILIDAD A DESLIZAMIENTOS EMPLEANDO EL PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA EN UNA CARRETERA AMAZÓNICA DEL ECUADOR

Siguiendo en el ámbito de ciencias de la tierra, en este artículo presentado por Cristian Cargua, Ronny Espin, Bryan Valencia, Marco Simbaña, Sebastián Araujo, Anderson Ocampos y Carolina Cornejo, investigadores de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos de Perú, la Universidad Regional Amazónica Ikiam y la Universidad de Investigación de Tecnología Experimental Yachay de Ecuador abordan uno de los problemas más frecuentes en las zonas andinas y amazónicas: los deslizamientos de tierra. Y es que debido a las fuertes lluvias cada vez más frecuentes debido a los efectos del cambio climático, la tala indiscriminada, y a las propias características geodinámicas de la zona, los deslizamientos de tierra y laúdes tienen un costo cada vez más alto en daños a infraestructuras, carreteras e inclusive vidas humanas.

Esta investigación aborda el caso de la carretera Puyo-Tena para la cual se generó un modelo cartográfico de susceptibilidad a deslizamientos a partir de variables como la pendiente, las formaciones geológicas, la cobertura y uso de la tierra, así como las distancias a fallas, carretera y ríos. El manejar tantas variables puede ser un problema de decisión complejo, para lo cual se utiliza un proceso de jerarquía analítica, método semicuantitativo que clasifica las variables en cinco categorías de susceptibilidad de fácil entendimiento para los tomadores de decisión y la comunidad en general; de esta manera se podrán tomar las decisiones pertinentes para mitigar eventos potenciales que puedan poner en peligro a la comunidad.

DETERMINACIÓN MOLECULAR DEL AGENTE ETIOLÓGICO DE LA MASTITIS BOVINA DE MUESTRAS PROVENIENTES DE UNIDADES PRODUCTORAS ANDINAS

En el ámbito de las ciencias veterinarias, Nancy Bonifaz, Ximena Galarza, Byron Fuertes y Janss Beltrán, investigadores de la Universidad Politécnica Salesiana y el Instituto Nacional de Investigación en Salud Pública-INSP del Ecuador, nos presentan una de la investigaciones más completas en el estudio de la mastitis bobina en zonas andinas ecuatorianas, llevada a cabo a nivel molecular, a través de la técnica medio de reacción en cadena de la polimerasa (PCR) la cual permite reconocer familia, género y especie de microorganismos, además de detectar genes de resistencia de antibióticos, lo que resulta importante al momento de diagnosticar y tratar enfermedades. De esta manera, se encontraron nueve agentes etiológicos causantes de la enfermedad, así como casos de resistencia a varias de las especies identificadas.

RESPUESTA DEL MAÍZ HARINOSO *(ZEA MAYS* L. VAR. AMYLACEA) A LA INOCULACIÓN DE *AZOSPIRILLUM* Y PSEUDOMONAS

En el campo de las ciencias agropecuarias, José Sangoluiza, José Zambrano, Misterbino Borgues y Kang J. Cho, investigadores del Korea Program on International Agriculture (KOPIA), del Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP) de Ecuador, y de la Universidad de Granma de Cuba, nos presentan una alternativa agroecológica para la fertilización del maíz harinoso INIAP-101, a través de la utilización de bacterias benéficas que

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

habitan la rizósfera de las plantas debido a la capacidad de éstas de producir fitohormonoas. Estas fitohormonas producen en la planta una mayor absorción de nutrientes y, por lo tanto, un rápido crecimiento vegetativo y mayor producción sin la utilización de fertilizantes químicos, por lo que nos presentan una alternativa sostenible para el cultivo de esta variedad de maíz en la región.

EFECTO DE LA DENSIDAD DE PLANTAS SOBRE LOS COMPONENTES DEL RENDIMIENTO DE FRÉJOL CULTIVADO EN CONDICIONES DE CAMPO EN UN VALLE INTERANDINO DE ECUADOR

Siguiendo en la temática de las ciencias agropecuarias, Santiago Vásquez, Edwin Villavicencio, Alex Guamán, Marlene Molina y Camilo Mestanza, investigadores de la Universidad Nacional de Loja y la Universidad Técnica Estatal de Quevedo del Ecuador, nos presentan un estudio respecto a los factores que determinan el rendimiento del fréjol, modificando la densidad en el sembrío del grano, encontrando que ésta es un factor fundamental en el momento de determinar su rendimiento, es decir número y peso de los granos estudiados.

Estamos seguros que esta selección de artículos será útil no sólo dentro de las investigaciones que nuestros lectores llevan a cabo, sino también como un panorama de los avances científicos en el área de Ciencias de la Vida que se realizan en la región. Y es que la función de difusión y divulgación que cumplen las revistas científicas, junto con los desafíos que giran en torno a ser una revista indexada en bases de datos importantes, conlleva a ser observados como modelo de institucionalidad, donde confluyen la sostenibilidad, la sustentabilidad y la Responsabilidad Social Empresarial RSE, temática por demás sugestiva para la creación de líneas de investigación que permitan realizar estudios que pudieran resultar interesantes, donde se evalúe y se compare entre medios de divulgación de alta calidad como la Granja.

Culminamos compartiendo un extracto de un artículo que expresa y resume la relación entre la revista y las capacidades que desarrolla, basadas en prácticas responsables que pueden ser visualizadas por todos, donde se habla de la evolución del concepto de RSE ligada a la filantropía y luego relacionada con la sostenibilidad, convirtiéndose en un concepto más elaborado, que asocia la RSE con "una gestión responsable de las externalidades" y la incorporación en la gestión de las expectativas de los tomadores de decisión, la creación de valor compartido y un rol protagónico de la empresa, en la construcción de un "desarrollo sostenible…" (Daniel Licandro y col., 2019).

Cordialmente,

PhD. Ignacio de los Ríos[1]
Universidad Politécnica de Madrid
EDITOR EN JEFE

PhD. Sheila Serrano Vincenti[2]
Universidad Politécnica Salesiana
EDITORA EN JEFE

PhD. Lisandro José Alvarado-Peña[3]
Universidad del Zulia, Venezuela
EDITOR INVITADO PRINCIPAL

Referencias

Alvarado-Peña, L. J. y D.M. Echeverri De la Hoz (2020). «Gerencia, Investigación y Desarrollo Sustentable en las organizaciones de América Latina y el Caribe (ALC)». En: *Revista Venezolana de Gerencia* 24.12, 13-16. Online:https : / / doi . org / 10 . 37960 / revista . v24i2 . 31482.

Daniel Licandro, O. y col. (2019). «Responsabilidad Social Empresaria: Hacia la conformación de una tipología de definiciones». En: *Revista Venezolana de Gerencia* 24.85, 281-299. Online:https : / / doi . org / 10 . 37960 / revista.v24i85.23843.

Gobierno de México (2018). *Diferencia entre sustentable y sostenible. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales*.

[1]Orcid ID: https://orcid.org/0000-0003-2015-8983
[2]Orcid ID: https://orcid.org/0000-0002-9977-6882
[3]Orcid ID: https://orcid.org/0000-0001-5097-811X

La Granja: *Revista de Ciencias de la Vida* 39(1) 2024:7-10.
©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

La granjA:
Revista de
Ciencias de la Vida
pISSN:1390-3799; eISSN:1390-8596
http://doi.org/10.17163/lgr.n39.2024.01

Número Especial/ Special Issue

Desarrollo Sustentable

CC BY NC SA

La Etnoeducación como instrumento para la promoción del desarrollo sustentable. Un análisis desde la cienciometría

Ethnoeducation as an instrument for the promotion of sustainable development. An analysis from scientometrics

Hugo Alexánder Semanate Quiñonez*[1] y Ciro Alfonso Serna Mendoza[2]

[1]*Centro de Comercio, Servicio Nacional de Aprendizaje SENA, Código Postal 050015, Medellín, Colombia.*
[2]*Doctorado en Desarrollo Sostenible, Universidad de Manizales. Código Postal 170002, Manizales, Colombia.*

*Autor para correspondencia: hasemanateq@unal.edu.co

Manuscrito recibido el 02 de agosto de 2022. Aceptado, tras revisión, el 20 de marzo de 2023. Publicado el 1 de marzo de 2024.

Resumen

La etnoeducación permite avanzar hacia la interculturalidad, reconociendo las diversidades de culturas con que cuenta el estado colombiano; sin embargo, no se evidencia una ruta formativa clara como proyecto social que reivindique el saber de las comunidades y que permita fortalecer los procesos de identidad cultural necesarios para la pervivencia de los Pueblos Originarios. El objetivo del trabajo es responder si la etnoeducación aporta a la promoción del desarrollo sustentable desde el acto pedagógico de los Pueblos Originarios. Para lograrlo se hizo una revisión literaria de las publicaciones más citadas de los años 2017 a 2021 en las bases de datos *Scopus, Web Of Science* y *Dimensions*, seleccionadas por el idioma inglés, español y las palabras clave indexadas en el diccionario Tesauros de la UNESCO. En el análisis de la producción científica se utilizaron las herramientas Cienciométricas *RStudio-Cloud, Bibliometrix* y el método de *Tree of Science (ToS)*. Asimismo, se manipuló los softwares *VOSviewer* y *Gephi* para identificar las subáreas de investigación y generar la red de conocimiento. El trabajo permitió marcar la evolución de la producción científica anual con 1.124 documento científicos, el mapa temático con tópicos emergentes relacionados a pedagogía, docencia, cultura, conocimientos ancestrales y la red de conocimiento forjada por los autores más importantes para este trabajo. Como conclusión principal se identificó que los procesos educativos deben surgir desde las comunidades étnicas, los cuales buscan transmitir las prácticas ancestrales, impulsar la sustentabilidad, educar al ser sin adaptarlo a doctrinas y modelos educativos desarrollistas.

Palabras clave: Bibliometría, Conocimientos indígenas, Ciencias de la educación, Desarrollo sostenible, Diversidad cultural.

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Abstract

Ethno-education allows advancing towards interculturality, recognizing the diversity of cultures in Colombia; however, there is no evidence of a clear formative route as a social project that vindicates the knowledge of the communities and allows strengthening the processes of cultural identity necessary for the survival of the Indigenous Peoples. The objective of this work is to answer whether ethno-education contributes to the promotion of sustainable development from the pedagogical act of the Indigenous Peoples. For this, a literature review was carried out from the most cited publications from the years 2017 to 2021 in the *Scopus, Web of Science* and *Dimensions* databases, selected by the English language, Spanish and the keywords indexed in the UNESCO Thesauri dictionary. In the analysis of scientific production, the scientometric tools *RStudio-Cloud, Bibliometrix* and the *Tree of Science (ToS)* method were used. The *VOSviewer* and *Gephi* software were also used to identify the research subareas and generate the knowledge network. The work allowed marking the evolution of the annual scientific production with 1,127 scientific documents, the thematic map with emerging topics related to pedagogy, teaching, culture, ancestral knowledge, and the knowledge network forged by the most important authors for this work. As a main conclusion, it was identified that the educational processes should arise from the heart of the ethnic communities, which seek to transmit ancestral practices, promote sustainability, educate the being without adapting it to developmentalist doctrines and educational models.

Keywords: Bibliometry, Indigenous knowledge, Educational sciences, Sustainable development, Cultural diversity.

Forma sugerida de citar: Semanate Quiñonez, H., y Serna Mendoza, C. (2024). La Etnoeducación como instrumento para la promoción del desarrollo sustentable. Un análisis desde la cienciometría. La Granja: Revista de Ciencias de la Vida. Vol. 39(1):11-26. http://doi.org/10.17163/lgr.n39.2024.01.

IDs Orcid:

Hugo Alexánder Semanate Quiñonez: http://orcid.org/0000-0001-7616-2039
Ciro Alfonso Serna Mendoza: http://orcid.org/0000-0003-3192-9771

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

1 Introducción

La etnoeducación floreció a mediados de los años setenta, como forma de resistencia de la cultura ancestral frente a los modelos de educación centrados en el desarrollo del país, logrando el reconocimiento paulatino por parte del estado de sus comunidades y generar interés para comprender su cultura desde una mirada ontológica y epistemológica.

Se debe tener en cuenta las luchas de las clases que se creen minoritarias en el país como son las negritudes, raizales y pueblos nativos, los cuales aún conservan sus prácticas tradicionales a pesar de la lucha constante que han venido librando desde la entrada de los españoles en América Latina. La etnoeducación en Colombia está relacionada con los procesos condicionantes a los privilegios de la Iglesia en los territorios ancestrales, sumado a la resistencia histórica de los grupos étnicos sometidos a una educación oficial católica que desvincula sus culturas y formas de vida (Molina, 2012), "cuyo proceso educativo consistía en la castellanización y desindianización de los pueblos indígenas" (Vitonás, 2010, p. 2).

La etnoeducación nace en los mismos Pueblos Originarios, en la raíz de la Madre Tierra, donde los etnoeducadores no solo enseñan, sino que son sabios, médicos, guardias y líderes que articulan los diferentes procesos en las comunidades en pro de la sustentabilidad de los territorios; es el punto de partida que permite la reconstrucción radical del ser, del poder y del saber indígena por medio de sus prácticas cotidianas (Barragán-Varela, 2020). Como desarrollo de la democracia, según Mendoza-Castro (2010, p. 4) "la etnoeducación es un instrumento que permite a las poblaciones indagar sobre las estrategias pedagógicas, administrativas y metodológicas que mejor se adaptan a su manera de convivir y a su cultura", la cual ha sido determinante para que las comunidades tengan la oportunidad de realizar programas etno-educativos que reconozcan su cultura y cumplan con los objetivos de salvaguardar las tradiciones ancestrales. Aunque desde la creación de la Constitución de Colombia de 1991 se encuentran avances en políticas etnoeducativas, tales como la Ley 115 (Congreso de Colombia, 1994) que permite el derecho de la educación oficial, la cual se enfoca en la enseñanza-aprendizaje, se sigue vulnerando a las comunidades étnicas, obligándolas a tomar el currículo que no incluye sus imaginarios y legados culturales.

Los Pueblos Originarios también se apoyan principalmente de las herramientas jurídicas como las que brinda el Decreto 2500 de 2010 (Colombia, Presidencia de la República, 2010) que permite el desarrollo del Sistema Educativo Indígena Propio (SEIP); Decreto que se ha enfocado a la dotación de los establecimientos educativos para básica primaria y secundaria. También el Decreto 1953 (Colombia, Presidencia de la República, 2014), el cual articula la administración propia de los Territorios Ancestrales y que pretende enfocarse en la educación inicial, primera infancia o despertar de las semillas de vida; el Decreto 1811 (Congreso de Colombia, 2017) con el cual se busca la financiación de los procesos de educación desescolarizada o necesidades de la comunidad, tales como formar jóvenes, artes, la guardia indígena, procesos que desde la escuela no se pueden responder. Esta normativa permite consolidar estructuras locales, zonales y regionales para lograr la emancipación propia en el sistema educativo propio a partir de la autonomía financiera, en el desarrollo y vivencias pedagógicas y en orientar, dirigir y direccionar la educación propia.

Existen grandes avances, pero aún no se logra consolidar que su educación propia pueda ser aplicada a una educación colectiva. Es necesario reconocer la complejidad étnica y cultural colombiana y Latinoamericana para exigir superar los enfoques educativos unificadores y homogeneizadores (Rojas-Curieux, 2019). Un posible camino es generar procesos educativos enfocados en estas minorías étnicas, lo cual sienta las bases para crear una conciencia colectiva que permita la inclusión y el conocimiento de todas las diferentes culturas que existen en una nación (Osorio-Mejía y Lozano-Céspedes, 2019). Lo anterior permitirá la afirmación de los derechos constitucionales de esta población, por lo cual se adecua pedagógica y legislativamente al contexto pluriétnico y multicultural del país, en lo denominada Educación Bilingüe Intercultural, que, para el caso de Colombia, es la llamada educación para la diversidad cultural o etnoeducación, la cual es definida en términos propios como el espacio para otras educaciones posibles.

Con estas leyes se logra fortalecer el idioma y los modos de vida de los pueblos originarios, permitiendo su dignidad, libertad e igualdad en derechos (Sánchez-Moreno y Escalera-Silva, 2021). No obstante, las políticas parten de principios universales antropológicos que proponen la educación como el camino para alcanzar el progreso social y la inclusión étnica en un país (Ruiz-Cabezas y Medina-Rivilla, 2014). En este sentido, las comunidades étnicas, originarias del territorio, tejen y ligan el concepto de Desarrollo Sostenible (Brundtland, 1987) a partir de las tradiciones y las cosmovisiones (Cuervo-González, 2017); es decir, desde la irradiación del saber ancestral, las prácticas ancestrales y vernáculas, la cultura y las experiencias de conservación de la biodiversidad de sus territorios para las futuras generaciones y humanidad entera (Chen y Gilmore, 2015; García-Parra y col., 2022).

Para lograr integrarlo, es necesario que los docentes y etnoeducadores tengan conocimientos, competencias, valores y actitudes acordes para desempeñar dicha tarea,

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

contar con un contenido enfocado a la mejora de la sociedad, la economía y el ambiente a partir de etnopedagogías interactivas que logren obtener proyectos sustentables para la vida. Tobón y col. (2018) analizan las prácticas pedagógicas desde la cartografía conceptual. Esta mirada permite generar acciones hacia el desarrollo social sostenible a partir de la sociedad del conocimiento, ya que la formación de comunidades permite encontrar soluciones a los problemas del contexto y el territorio, brindando así condiciones reales y mejores de vida de las personas. Acevedo-Osorio, Przychodzka y Pinilla (2020) vinculan la preservación de los agro sistemas y la biodiversidad como una estrategia de la agricultura familiar. Lo anterior permite adaptarse y responder a los problemas e imposiciones que soportan sus estructuras de producción, convirtiéndose en el componente definitivo de los procesos etnoeducativos frente a lo definido como sustentabilidad, lo cual mejora las condiciones de bienestar de las comunidades en su territorio (Castro-Castro, Beltrán-Díaz y Vargas-Espítia, 2021).

Otro caso es el que presentan Peralta y col. (2019), quienes proponen un modelo de etnoeducación para la comunidad Mokaná de Malambo Colombia. Éste *modelo* tiene como raíz preservar sus lenguas, tradiciones y prácticas ancestrales para las nuevas generaciones. Por consiguiente, es necesario fomentar una educación más completa y de excelencia, donde todos los estudiantes puedan contribuir a la sustentabilidad desde la socioformación (Merlo, 2020). También deben aprender por automotivación, buscando soluciones a conflictos y dejando de un lado la educación tradicional que está basada en asignaturas, lo cual afecta la creatividad y el emprendimiento (Tobón y col., 2018).

Los alumnos también deben apropiarse de todo un contexto ofrecido por los docentes en el cual se les brindan las herramientas para tener un criterio propio de equidad, tolerancia, justicia social, preservación, restauración y conservación de los recursos naturales; con todas estas bases se logrará trascender en el tiempo con mejores condiciones de desarrollo social y bienestar de las comunidades. En conclusión, la propuesta educativa del Estado colombiano no ha tenido en cuenta la incorporación de los saberes propios, ni los aportes de otros miembros diferentes a los docentes encargados de impartirla.

De acuerdo con lo anterior, el trabajo tiene como objetivo principal realizar una exploración bibliométrica de los avances de los estudios científicos en etnoeducación, etnopedagogía y su aporte a la promoción del desarrollo sustentable apoyado en herramientas Cienciométricas, con lo cual se responde si la etnoeducación aporta a la promoción del desarrollo sustentable desde el acto pedagógico en los Pueblos Originarios.

2 Metodología de investigación

El trabajo se lleva a cabo desde el paradigma cualitativo (Strauss y Corbin, 2016) y cuantitativo (Díez-Gómez, Guillén y Rodríguez, 2019); es de naturaleza descriptiva, exploratoria, no experimental, corte transversal simple e interpretativo, ya que se hace una interpretación de los documentos científicos analizados para generar categorías de estudio a partir del método de revisión sistemática mixta (Oraee y col., 2017). Por lo tanto, se recogió una descripción de los criterios de elegibilidad, fuentes de investigación y búsqueda, así como el proceso de selección del estudio, extracción de datos y síntesis de resultados encontrados en los índices de las bases de datos de *Scopus, Web of Science* y *Dimensions*, lo cual permitió seleccionar los documentos científicos de mayor relevancia frente a los subtemas relacionados de etnoeducación, etnopedagogía y desarrollo sustentable.

En el proceso se utilizaron técnicas bibliométricas apoyadas en *Bibliometrix* (Aria y Cuccurullo, 2017), *Tree of Science [ToS]* (Zuluaga y col., 2022; Robledo y col., 2022), análisis de redes de conocimiento por medio de *Gephi* (Zuluaga-Rojas y col., 2016; Blondel y col., 2008), minería de texto a partir de *VOSviewer* (Van Eck y Waltman, 2020) *Word-Cloud* (Fellows, 2018) y bitácora de revisión (Semanate-Quiñonez, Upegui-Valencia y Upequi-Valencia, 2022). La Figura 1 presenta los momentos definidos metodológicamente, las herramientas utilizadas y los productos de este estudio.

2.1 Momento I: Proceso de búsqueda

Como primer paso se realizó un análisis bibliométrico del tema de investigación de la producción científica encontrada en *Scopus, Web of Science* y *Dimensions* del 2017 al 2021; las fuentes consultadas en diciembre de 2021 siguieron los criterios de selección: año, más citados y tema. Las áreas de investigación por las cuales se filtraron los resultados fueron: *Education or Studies in Human Society or Sociology or Curriculum and Pedagogy or Cultural Studies or Specialist Studies in Education or Language, Communication and Culture, Ethnic Studies, Social Sciences Interdisciplinary, Education Educational Research*. En la base de datos de *Dimensions* se filtró por los Objetivos del Desarrollo Sostenible: 4 *Quality Education or 10 Reduced Inequalities* or 1 *No Poverty*. Tipo de artículos: *Bronze or Hybrid or Green or Gold or All OA*. Lo anterior arrojó los avances y tendencias investigativas del tema estudiado, información sistematizada en el instrumento diseñado por Semanate-Quiñonez, Upegui-Valencia y Upequi-Valencia (2022).

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

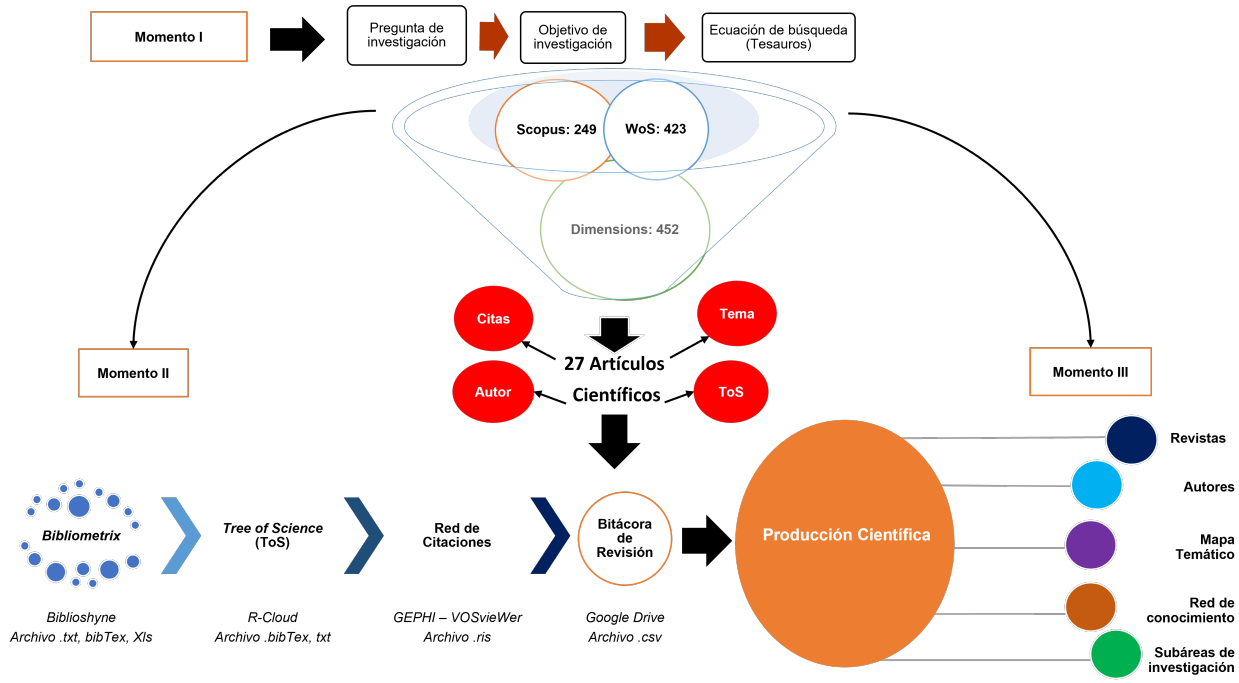

Figura 1. Figura inspirada a partir del método prisma (Sánchez-Meca y Botella, 2010) y Burbano-Criollo (2022).

2.2 Momento II: Tree of Science

Los resultados obtenidos de las consultas anteriores fueron analizados en la herramienta *Web Tree of Science (ToS)*, categorizado como un método de revisión bibliográfica sistemática con enfoque cuantitativo (Díez-Gómez, Guillén y Rodríguez, 2019) y que según Robledo y Duque-Méndez (2017), ToS clasifica los documentos científicos como Raíz a los trabajos seminales o clásicos; Tronco a los trabajos estructurales que dan continuidad o fundamento a la raíz; y Hojas a los trabajos actuales o emergentes y que pueden categorizarse como tendencia investigativa (Zuluaga-Rojas y col., 2016). A través de este método se logró identificar los documentos científicos indexados más notables y relacionados con las áreas de la etnoeducación, etnopedagogía y población étnica, registrando sus avances y tendencias de investigación frente al desarrollo sustentable.

2.3 Momento III: Análisis e interpretación de subáreas de investigación

Para identificar las subáreas de investigación se analizaron las bases de datos en el software VOSviewer (Van Eck y Waltman, 2020) y los resultados se triangularon con los resultados del *Tree of Science* generado en *RStudio-Cloud* (Zuluaga-Rojas y col., 2016) para identificar los tres tópicos más significativos en el área de investigación. El algoritmo de clusterización aplicado en el software *Gephi* permitió obtener la red de conocimiento de investigación (Blondel y col., 2008). Finalmente, se analizaron las bases de datos obtenidas en *RStudio -Cloud* con el paquete de *Bibliometrix* (Aria y Cuccurullo, 2017), el cual arrojó la producción científica anual, los autores más citados, las fuentes con mayor índice de citas y el mapa temático de tendencias de investigación, para así seleccionar los artículos de mayor importancia temática.

3 Resultados y discusión de investigación

En el ejercicio de revisión se seleccionaron los documentos científicos que determinaron la comprensión de los aportes de la etno-pedagogía frente al desarrollo sustentable. La Tabla 1 presenta las fuentes de información, la ecuación de búsqueda y el total de resultados encontrados y filtrados a partir de las palabras clave y tesauro de la UNESCO (2021).

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Tabla 1. Criterios de revisión.

Fuente de información	Ecuación de búsqueda	Palabras clave/Tesauros UNESCO	Total
Dimensions	"Education AND pedagogy AND indigenous AND ethnicity"	* Comunidades indígenas, buen vivir, etnoeducación. * Grupo étnico, pedagogía, educación bilingüe.	452
Scopus	(Education) AND (pedagogy) AND (indigenous)	* Etnicidad, socioformación, etnoeducación, sustentabilidad, interculturalidad * Pedagogía, identidad nacional.	249
Web of Science	"Education AND pedagogy AND indigenous"	* Socioformación * Prácticas pedagógicas	423

3.1 Resultados Cienciométricos

A partir de los resultados arrojados por las consultas hechas en las fuentes de información, se encontró que la indexación científica del período analizado en el tema de investigación ha incrementado. La mayoría de las publicaciones están indexadas en *Dimensions* con 453 documentos, seguida de *WoS* con 309 y *Scopus* con 149 documentos científicos (ver Figura 2).

El análisis realizado con Bibliometrix permitió encontrar los países con mayor número de investigaciones en el tema como lo presenta la Figura 3.

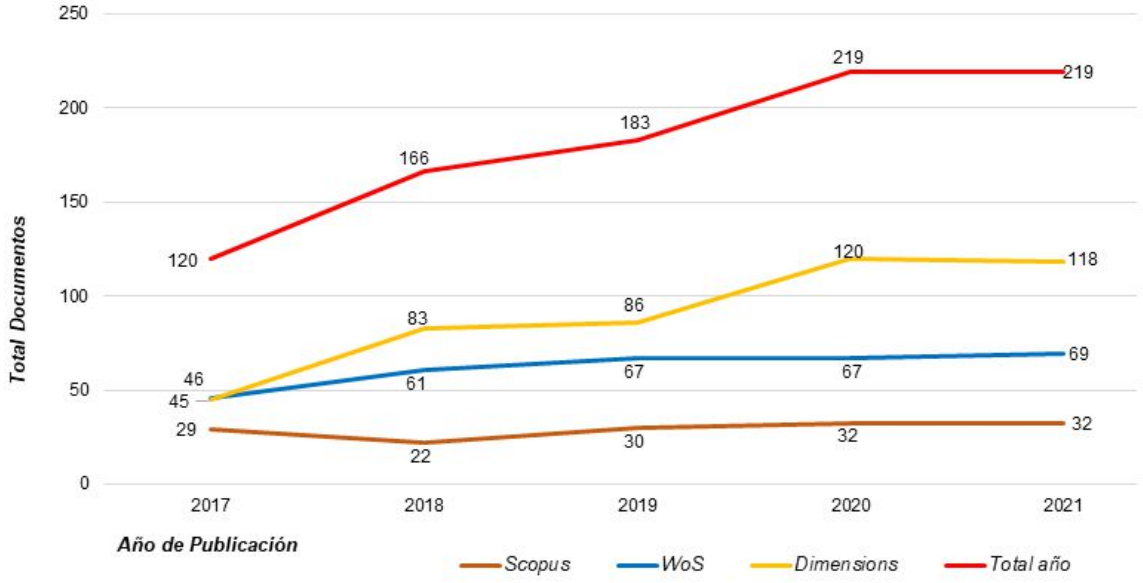

Figura 2. Producción científica anual por total de trabajos publicados.

LA GRANJA: *Revista de Ciencias de la Vida* 39(1) 2024:11-26.
©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

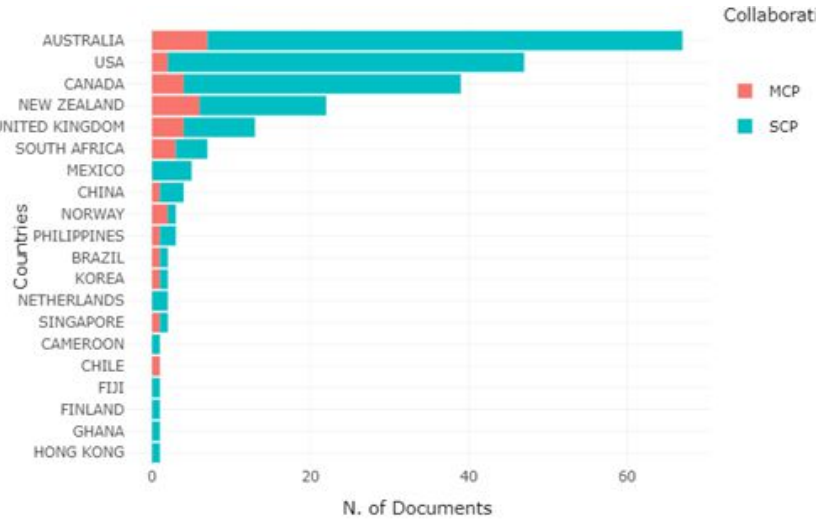

Figura 3. Producción científica por país.

Australia ocupa el primer lugar con más de 60 documentos científicos, seguido de Estados Unidos; sin embargo, es de resaltar que entre los 20 países más influyentes hay tres sudamericanos, México, puesto siete, Brasil en el once (11) y Chile en el puesto dieciséis (16).

Bibliometrix, por medio de *RStudio-Cloud*, permitió identificar los tópicos de tendencia investigativa, sintetizados en el mapa temático de la Figura 4. Los resultados muestran que los temas y autores más citados frente a los temas de investigación son: pedagogía (Walsh, Oliveira y Candau, 2018), conocimientos autóctonos (Zurita-Álava, Murillo-Calderón y Defaz-Gallardo, 2017), integralidad (Williamson, 2004; Williamson, 2005), ubicando en el centro del mapa los tópicos con más centralidad y densidad de temas. En el mismo orden se identifica un aumento del uso del concepto de diversidad (López, 1997; Zurita-Álava, Murillo-Calderón y Defaz-Gallardo, 2017) y didácticas inclusivas (Colom Cañellas, 1998).

Para llevar a cabo un análisis de los documentos científicos seleccionados, se elaboró la red de conocimiento con los autores que aportan significativamente al análisis del tema de investigación. Para lograrlo, se generó en *RStudio-Cloud* los "targets y sources" para luego obtener el gráfico en el software *Gephi* (Darko y col., 2019; Dervi ş, 2019) y editarlo en *Inkscape* como lo muestra la Figura 5.

ToS también sirvió como referencia para la identificación y el análisis de los conceptos, permitiendo así la visualización de miradas pedagógicas e interculturales influenciadas por legados ancestrales de sus cosmovisiones. La Tabla 2 del anexo sintetiza el Árbol de la Ciencia generado por ToS en la herramienta *Web RStudio Cloud*, categorizado por área temática y el total de citas de las obras. *ToS* arrojo nueve (9) documentos científicos raíz, seminales, entre los cuales se destacan Tuck y Wayne Yang (2012), quienes trabajan la descolonización y la vida indígena; Nakata (20007) con la educación y el análisis de los estudiantes nativos en los procesos de educación formal para descolonizar los estudios y enfoque pedagógico indígena. Diez (10) documentos científicos del tronco, estructurales y conectores de la raíz, Entre eos autores más citados están Ladson-Billings (1995) quien trabaja la investigación pedagógica, la mejora de la educación y la investigación colaborativa y reflexiva; Gruenewald (2003) con la pedagogía crítica y la educación basada en el lugar, relaciones humanas, descolonización y la reintegración, y Wolfe (2006) con el colonialismo de colonos y la eliminación de los nativos.

McCarty (2014) abordan la pedagogía crítica de sostenimiento y educación indígena basada en la cultura. Sutherland y Swayze (2012) la educación científica en entornos indígenas y la importancia del lugar en el contexto indígena, al igual que Madden (2015), quien trabaja la pedagogía para la descolonización, educación indígena y antirracista basada en el lugar. Diez (10) documentos científicos categorizados como Hojas o de tendencia investigativa y/o emergente esta Harrison (2020) y Dreamson (2018) y Dreamson (2016), quienes trabajan las culturas pedagógicas indígenas, educación intercultural y diversidad cultural. Higgins (2014) con la teoría descolonizaste, conocimiento y las formas de ser indígenas, lo cual abre nuevos paradigmas de educación y modelos lingüísticos (Hino, 2018; Hino, 2020). Burgess, Bishop y Lowe (2020) aportan sobre el aprendizaje profesional de los maestros desde la descolonización de la educación indígena.

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

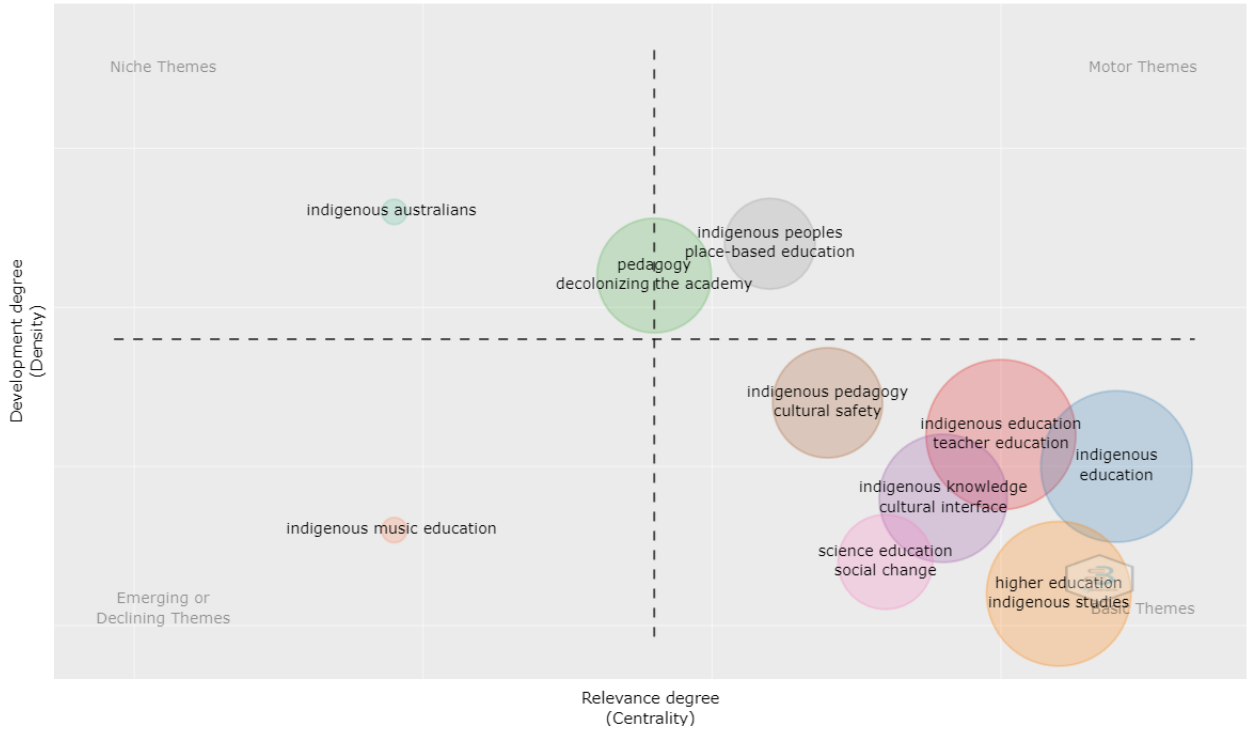

Figura 4. Mapa temático y tendencias generados por *biblioshiny* para *Bibliometrix* en enero de 2022. La densidad refiere a la correlación de tópicos; mientras que, la centralidad refiere a la frecuencia de citas.

Scully (2020) frente al conocimiento común de los profesores, los pueblos, las tierras y las historias para la educación indígena, y Sosa-Provencio y col. (2019) analizan la pedagogía arraigada para la construcción de una conciencia crítica y pedagogías que apoyan, involucran y mejoran los resultados educativos de los estudiantes aborígenes Burgess y col. (2019). Finalmente, para identificar clúster y tendencias en investigación, se procesaron las bases de datos en el software *VOSviewer*, el cual permite hacer un análisis de normalización con el método de fraccionamiento a partir del número de ocurrencias por tema y año de publicación. La Figura 6 presenta las subáreas de mayor concentración investigativa definidas por la educación, pedagogía y conocimiento frente al desarrollo sustentable, las cuales direccionan la disertación a partir de los autores seleccionados.

3.2 Resultados de las subáreas de investigación

Para destacar los principales tópicos de tendencia y que dan relevancia a la investigación se hace referencia a:

- Pedagogía: el autor con más índice de citación en este tópico es Albirini (2006), quien trabajó las actitudes de los profesores frente al uso de las TIC´s para revolucionar el sistema educativo.
- Innovación pedagógica: Aguilera-Martínez y col. (2015) aportan cómo construir el aprendizaje a través de la experiencia e imaginarios que proyectan los alumnos frente al entorno que habitan.
- Conocimientos autóctonos: Zurita-Álava, Murillo-Calderón y Defaz-Gallardo (2017) trabajan los saberes culturales en la crianza de los hijos.
- Integralidad: Walsh (2009), analiza la interculturalidad crítica y pedagogía de-colonial; apuestas (des) del *in-surgir*, *re-existir* y *re-vivir* Cuello Ramírez y Garrido Serpa (2020).
- Diversidad: el autor más significativo en este tópico es López (1997), quien aborda los problemas y retos de la educación rural colombiana.
- Didácticas: encontramos a Castellón (2018) quien trabaja la etnoeducación y las prácticas interculturales; y Murga-Menoyo y Novo (2017) quienes abordan la pedagogía para el desarrollo sostenible.
- Desarrollo Sustentable (DS): la sustentabilidad y DS es visto desde diferentes enfoques, no significan lo mismo y no tienen la misma dirección. El

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

desarrollo sostenible inscribe la idea de generar un cambio progresivo, mientras que lo sostenible es el proceso de mejora de la calidad de vida de las personas (Gallopín, 2003).

- Etnoeducación: analiza los pensamientos y prácticas que existen en las distintas comunidades étnicas, el proceso histórico y las culturas de los Pueblos Originarios frente al territorio. También permite incorporar al discurso pedagógico comunitario, el cual desentona frente a las tendencias globalizantes y modernista actuales, gestado desde lo estructural-colonial-racial, que ha forjado la pérdida de la identidad cultural, creencias y lengua de las comunidades étnicas (Acevedo, 2019).
- Cultura: Mora (2013) reflexiona de forma epistemológica sobre la cultura desde la experiencia humana en la naturaleza, el estancamiento evolutivo y comprensión como sistema. La cultura aporta a definir la Dimensión Ambiental, avanzar en el concepto de Sustentabilidad Ambiental del Desarrollo y profundizar en el Desarrollo Sostenible como compromiso integral de cada Nación y los Estados.

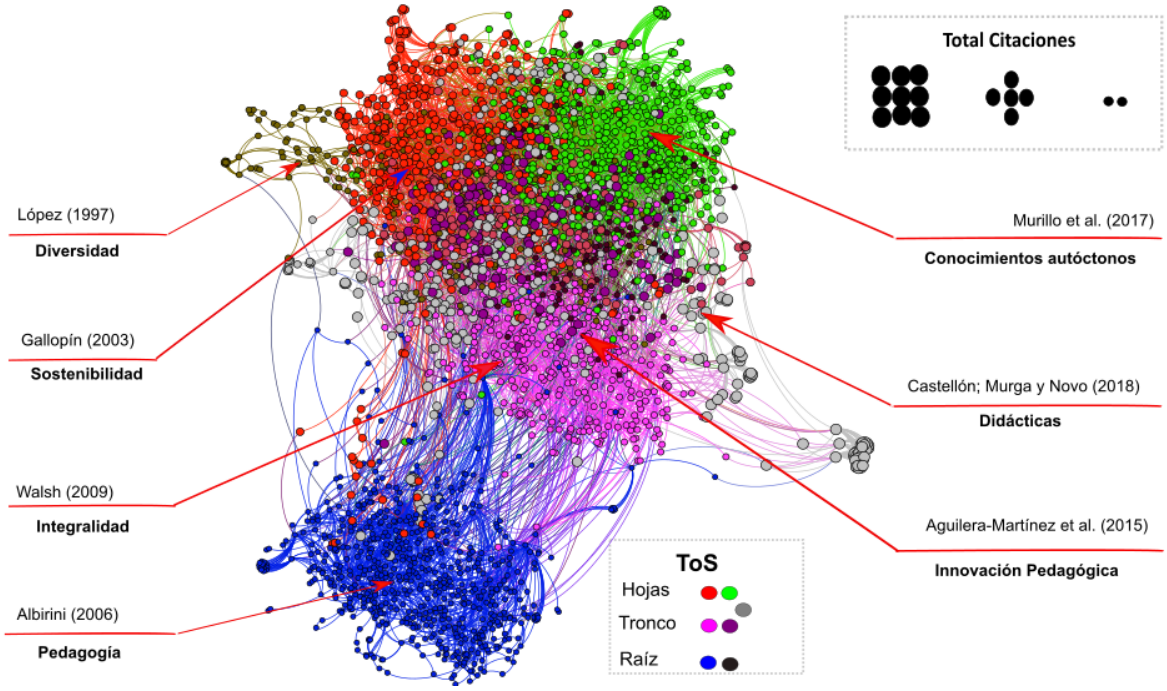

Figura 5. Red de conocimiento.

4 La Etnoeducación y Etnopedagogías para el Desarrollo Sustentable (DS)

Sustentabilidad

La pedagogía para la sustentabilidad enfatiza en la responsabilidad de la humanidad frente a la Madre Tierra, la naturaleza y los Territorios, la cual es necesaria a la hora de lograr la equidad social entre los individuos (Murga-Menoyo y Novo, 2017). Para lograrlo, además del crecimiento de una nación, es fundamental tener bases pedagógicas que son aplicables en el día a día de cada persona. Por consiguiente, es necesario mejorar el proceso pedagógico con énfasis en sustentabilidad, en ciudadanía planetaria y en glocalidad. La complejidad del proceso es adecuar y articular a toda la humanidad con la naturaleza en un modelo planetario que genere un desarrollo glocal acoplado a los planteamientos de la sustentabilidad (Murga-Menoyo y Novo, 2017).

Ahora bien, desde las propuestas etno-educativas que brindan las culturas indígenas, estas permiten identificar las visiones e imaginarios de sus comunidades para crear y valorar el mundo. La etnoeducación asume algunos principios de las miradas del Buen Vivir (Capitán y col., 2019) y de la educación ambiental (Vásquez, 2020), como la importancia de reedificar los conocimientos an-

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

cestrales, los cuales son rechazados por las lógicas occidentales, coactando la necesidad de hibridarlos con los conocimientos actuales, con lo que coincide el Modelo Comunitario de Desarrollo Sustentable, el cual permitiría encontrar estrategias innovadoras para solucionar la declive actual de la humanidad (Martínez, Almada y Espejel, 2016).

Por consiguiente, al no contarse con una definición clara del DS para comunidades étnicas y Pueblos Originarios dentro de un marco referencial de conceptos importantes que abarque la definición, se asume la de Martínez, Almada y Espejel (2016) el de "sustentabilidad comunitaria indígena", la cual articula tres enfoques importantes: 1) Modos de Vida Sustentable; 2) Modelo Comunitario de Desarrollo Sustentable, y 3) Buen Vivir, los cuales correlacionan y modulan las dimensiones del DS "ecológica, social, cultural, económica y política", pilares de los Pueblos Originarios.

Lo anterior lleva a crear una síntesis conceptual desde las comunidades y forjar formas para integrar el concepto de sustentabilidad a los territorios a partir de acciones de recuperación y rehabilitación de ecosistemas, aprovechamiento y uso sostenible de bienes y servicios ambientales (Mora, 2013).

Es así como podemos definir la sustentabilidad desde la etnoeducación como el proceso que permite la valoración, preservación y transmisión de los saberes ancestrales a partir del manejo apropiado de los recursos naturales que existen en el territorio y la conservación para las futuras generaciones; esto se da a partir de métodos etnopedagógicos que permiten la armonización del territorio, la soberanía y seguridad alimentaria, la recuperación de las practicas productivas tradicionales y un intercambio económico regional sostenible y equitativo [desde la mirada de los Pueblos Originarios]. Es así como la esencia de la etnoeducación para la sustentabilidad se gesta desde las Asambleas de los Pueblos y la participación de sus miembros en proyectos; además de la integración armoniosa de sus prácticas ancestrales con las actuales (Martínez, Almada y Espejel, 2016).

Como conclusión de este apartado, la etno-pedagogía es el proceso de vida en sí, ya que la enseñanza no solo se enfoca en educarse [formarse] en algo para el desempeño laboral, sino que también es esencial a comprender y aprender a valorar el planeta, la familia, e incluso la vida misma; todo esto es un aprendizaje que podría ser denominado como la pedagogía de la vida con constante método de aprendizaje para lograr la sustentabilidad.

Educación e Interculturalidad

Los Pueblos Originarios son la minoría más importante que conserva la realidad de los antepasados antes de ser una nación colonizada por culturas diferentes. La educación intercultural permite integrar los procesos de aprendizaje al entorno cultural e histórico, por lo cual es sumamente importante tener en cuenta toda la diversidad que existe en los territorios; no podemos de hablar de pedagogía democrática plural solo porque la mayoría son quienes marcan la diferencia.
Entonces ¿a quién debe educar la escuela? Castellón (2018) analiza la pregunta, la cual es planteada desde la antigüedad hasta nuestros días, en busca de una respuesta lógica y concreta que pueda determinar dicho enigma enfocado en el eje central de la política.

La respuesta a la pregunta es que la modernidad le ha inyectado a la escuela un modo de aprender a razonar a la sociedad moderna, donde precisamente se busca que los ciudadanos estén educados en un sistema de pensamiento y de comportamiento donde el propósito e interés sea reconocido por la mayoría de manera democrática; sin embargo, al darle continuidad a este modelo, las minorías nunca serán tomadas en cuenta y siempre serán vulnerados sus derechos. Por lo anterior, el Estado moderno debe proponer proyectos de formación de ciudadanías. Estos deben ser gestados desde las sociedades y administrados correctamente, donde la educación cívica o ciudadana sea una prioridad para mejorar e incluir a las políticas de Estado y en los Planes de Desarrollo el componente de educación propia y etno-pedagógico de las diferentes culturas existentes en la nación y no direccionada por un proyecto político dominante (Sánchez-Otero y col., 2019).

Etnoeducación y currículo

En cuanto a la implementación de la etnoeducación desde las políticas educativas, "se han generado corrientes de reflexión e innovación que han llevado a una modificación sustancial de la práctica educativa" (Ruiz-Cabezas y Medina-Rivilla, 2014): 6). Lo anterior, según Moreno y Silva (2021), ha logrado condenar los diferentes motivos de discriminación y brindar el derecho de participación política para la construcción de normativa educativa del Estado referente a las poblaciones étnicas, brindando así el disfrute de los derechos humanos colectivos e individuales.

Es así como los nuevos caminos que brinda la etnoeducación es lograr la integración y transversalidad del currículo de la escuela occidental frente al conocimiento (Nakata, 2011). Por eso es fundamental pensar otra forma de escuela, una que permita la vida, la valoración del saber ancestral a partir de la recuperación de las practicas, conocimiento y saberes, ya que la educación llegó con otros valores diferentes a los que tienen los Pueblos Originarios, desligada de los momentos de vida de las comunidades.

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

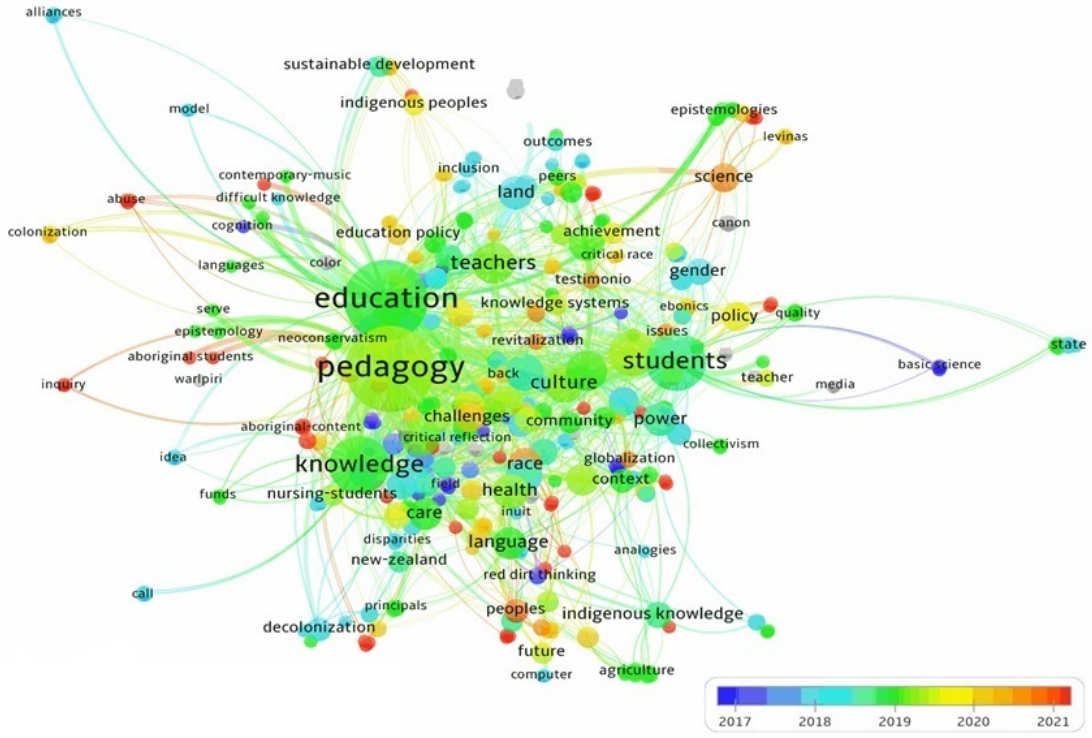

Figura 6. Subáreas de investigación. Figura elaborada con el software *VOSviewer*.

A raíz del estudio del currículo académico y la cimentación de estructuras propias, se ha logrado fortalecer las formas de etnoeducación, no el currículo como se conoce o se denomina, ya que esto significaría adecuar lo extranjero, el cual excluye áreas fundamentales del conocimiento de las comunidades étnicas enmarcado en el saber ancestral. Por lo cual, el conocimiento debe ser integrado, el pensamiento no puede ser fragmentado, condensado en un currículo. Hay que integrar el territorio y sociedad, la comunidad y naturaleza, las matemáticas y la producción, la comunicación y el lenguaje, la organización y la política, sin dejar lo fundamental, la sabiduría y cosmovisión ancestral.

También se encuentra que la "flexibilidad" de los programas para estudiantes étnicos propuestos por las Instituciones de Educación Superior (IES), son asumidos como de "baja calidad" y no se entiende la asociatividad de la "diferenciación" (Mato, 2011). Sumado a esto, es necesario diseñar instrumentos y procedimientos particulares de los procesos de evaluación que integren la mirada holística de las propuestas etnoeducativas, etnopedagógicos y de los contextos en que se desarrollan, inclusive sus docentes, etnoeducadores e investigadores.

Lo expuesto hasta aquí implica una tendencia de apropiación de la etnoeducación y etno- pedagogía en nuevos espacios interculturales y pedagógicos que se adaptan en simultaneidad con las prácticas tradicionales, las cuales permiten afirmar la identidad cultural, generar diálogos interculturales y lograr el encuentro con el otro (Castellón, 2018).

5 Conclusiones

La revisión permitió identificar la evolución en los retos y desafíos de la etnoeducación en contextos interculturales, donde los procesos educativos deben germinar desde la matriz de los Pueblos Originarios y con las prácticas tradicionales impulsar un nuevo "desarrollo" gestado desde el educar al ser y no adaptarlo a las doctrinas educativas tradicionales, logrando así una conservación de diversas culturas que siguen luchando para obtener una educación propia.

Desde los resultados analizados se evidencia la evolución de tópicos que integran la cultura, el conocimiento y las prácticas de las comunidades originarias frente a lo que se define como Desarrollo Sustentable. Por último, a partir de lo encontrado, es posible asemejar las culturas originarias, que por medio de su lenguaje y creencias logran

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

un conocimiento fundamentado de la investigación para la educación de su propia cultura (etnoeducación), enfocados en metodologías fuera de las aulas, con una educación basada en cómo orientar el proceso de aprendizaje desde sus visiones, creencias e imaginarios.

Contribución de los autores

Conceptualización, HASQ; tratamiento de datos, HASQ; análisis formal, HASQ; investigación, HASQ y CASM; recursos, CASM; metodología, HASQ; software, HASQ; visualización, HASQ y CASM; validación, CASM; escritura-borrador original, HASQ; supervisión, CASM; escritura-revisión y edición, CASM.

Referencias

Acevedo-Osorio, A., S. Przychodzka y J. Pinilla (2020). «Contributions of agrobiodiversity to the sustainability of family farming in Colombia». En: *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 23.2, 1-18. Online:https://bit.ly/3Lp5dxq.

Acevedo, S. (2019). «Educación y buen vivir: hacia una educación superior intercultural: estudio de caso del programa licenciatura en etnoeducación de la UNAD». Tesis doct. Uniandes.

Aguilera-Martínez, F. y col. (2015). «Estudio de los imaginarios sociales urbanos desde las prácticas pedagógicas.» En: *Revista de Arquitectura (Bogotá)* 17.1, 104-110. Online:https://n9.cl/xvz7r.

Albirini, A. (2006). «Teachers' attitudes toward information and communication technologies: The case of Syrian EFL teachers». En: *Computers y Education* 47.4, 373-398. Online:https://n9.cl/p7akj3.

Aria, M. y C. Cuccurullo (2017). «bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis». En: *Journal of informetrics* 11.4, 959-975. Online:https://n9.cl/m75bc.

Barragán-Varela, L. (2020). «Etnoeducación: Los nuevos retos de pensar la educación indígena en Colombia». En: *Revista del CISEN Tramas/Maepova* 8.1, 35-50. Online:https://n9.cl/1pvbs.

Blondel, V. y col. (2008). «Fast unfolding of communities in large networks». En: *Journal of statistical mechanics: theory and experiment* 2008.10, P10008. Online:https://n9.cl/h2p41.

Brundtland, G. (1987). *Informe de la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo: Nuestro futuro común*. Inf. téc. Documentos de las Naciones, Recolección de un Consejo de Administración de Acuerdos Globales. Online:https://bit.ly/34SKLUU.

Burbano-Criollo C., Aguilar-Montero M. Semanate-Quiñonez H. (2022). «La agricultura urbana como alternativa de abastecimiento de alimentos vegetales: un ejercicio desde la cienciometría». En: *Informador Técnico* 86.2, 254–277. Online:https://doi.org/10.23850/22565035.4427.

Burgess, C., M. Bishop y K. Lowe (2020). «Decolonising Indigenous education: the case for cultural mentoring in supporting Indigenous knowledge reproduction». En: *Discourse: Studies in the Cultural Politics of Education* 43.1, 1-14. Online:https://bit.ly/3QgwgOm.

Burgess, C. y col. (2019). «A systematic review of pedagogies that support, engage and improve the educational outcomes of Aboriginal students». En: *The Australian Educational Researcher* 46, 297–318. Online:https://bit.ly/46JCLjP.

Capitán, A. y col. (2019). «Los objetivos del Buen Vivir. Una propuesta alternativa a los Objetivos de Desarrollo Sostenible». En: *Revista iberoamericana de estudios de desarrollo= Iberoamerican journal of development studies* 8.1, 6-57. Online:https://bit.ly/3Q7PJjG.

Castellón, E. (2018). «Etnoeducación y prácticas interculturales de saberes otros». En: *Utopía y Praxis Latinoamericana* 23.83, 166-181. Online:https://n9.cl/2u779.

Castro-Castro, M., A. Beltrán-Díaz y A. Vargas-Espítia (2021). «Análisis sistémico de la sostenibilidad económica de unidades de producción agropecuaria familiar en una comunidad campesina de Lebrija, Colombia». En: *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida* 34.2, 141-153. Online:https://bit.ly/48BrGT3.

Chen, C. y M. Gilmore (2015). «Biocultural rights: A new paradigm for protecting natural and cultural resources of indigenous communities». En: *International Indigenous Policy Journal* 6.3, 1-17. Online:https://bit.ly/3O7LqDM.

Colom Cañellas, A. J. (1998). «El desarrollo sostenible y la educación para el desarrollo». En: *Pedagogía social: revista interuniversitaria* 2, 38-50. Online:https://bit.ly/3HHn5Bp.

Colombia, Presidencia de la República (2010). «Decreto No. 2500 de julio 12 de 2010». Online:https://bit.ly/3NkTjUZ.

— (2014). «Decreto 1953 de 2014». Online:https://bit.ly/3yjLlHu .

Congreso de Colombia (1994). «Ley 115 de febrero 8 de 1994. Por la cual se expide la ley general de educación.» Online:https://bit.ly/3OK54pe.

— (2017). «Decreto 1811 de 2017». Online:https://bit.ly/3NlxUeb.

Cuello Ramírez, H. y N. Garrido Serpa (2020). «Un análisis estructural y pedagógico al problema del reconocimiento étnico desde la interculturalidad en la Institución Educativa Álvaro Ulcue Chocue». Tesis de mtría. Institución Universitaria Politécnico Grancolombiano.

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Cuervo-González, L. (2017). *Un análisis estructural y pedagógico al problema del reconocimiento étnico desde la interculturalidad en la Institución Educativa Álvaro Ulcue Chocue*. CEPAL -Naciones Unidas.

Darko, A. y col. (2019). «A scientometric analysis and visualization of global green building research». En: *Building and Environment* 149, 501-511. Online:https://n9.cl/ykcdt.

Dervi ş, H. (2019). «Bibliometric analysis using Bibliometrix an R Package». En: *Journal of Scientometric Research* 8.3, 156-160. Online:https://bit.ly/3u4o9wX.

Díez-Gómez, D., M. Guillén y M. Rodríguez (2019). «Revisión de la Literatura sobre la Toma de Decisiones Éticas en Organizaciones». En: *Información tecnológica* 30.3, 25-38. Online:https://n9.cl/t0sq1.

Dreamson, N. (2016). *Reinventing Intercultural Education. A metaphysical manifest for rethinking cultural diversity*. Routledge Press.

— (2018). *Pedagogical Alliances between Indigenous and Non-Dualistic Cultures. Meta-Cultural Education*. Routledge Press.

Fellows, I. (2018). *Package "Wordcloud". Disponible en https://bit.ly/3CbyB7s*.

Gallopín, G. (2003). *Sostenibilidad y desarrollo sostenible: un enfoque sistémico*. CEPAL - Naciones Unidas.

García-Parra, M. y col. (2022). «Los Objetivos de Desarrollo Sostenible en América: Panorama». En: *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida* 36.2, 45-59. Online:https://bit.ly/4aUrvUx.

Gruenewald, D. (2003). «The best of both worlds: A critical pedagogy of place». En: *Educational researcher* 32.4, 3-12. Online:https://n9.cl/5ownb.

Harrison, N. (2020). «Country as pedagogical: enacting an Australian foundation for culturally responsive pedagogy». En: *Journal of Curriculum Studies* 52.1, 15-26. Online:https://bit.ly/3SaHC9q.

Higgins, M. (2014). «De/colonizing Pedagogy and Pedagogue: Science Education Through Participatory and Reflexive Videography». En: *Canadian Journal of Science, Mathematics and Technology Education* 14.2, 154-171. Online:https://bit.ly/46McTno.

Hino, N. (2018). *EIL Education for the Expanding Circle. A Japanese Model*. Routledge Press.

— (2020). «ELF Education for the Japanese Context». En: *English as a Lingua Franca in Japan: Towards Multilingual Practices*. Ed. por M. Konakahara y K. Tsuchiya. Springer International Publishing, págs. 27-45.

Ladson-Billings, G. (1995). «Toward a theory of culturally relevant pedagogy». En: *American Educational Research Journal* 32, 465-491. Online:https://bit.ly/3MhCLPP.

López, L.E. (1997). «La diversidad étnica, cultural y lingüística latinoamericana y los recursos humanos que la educación requiere». En: *Revista Iberoamericana de Educación* 13.1, 47-58. Online:https://bit.ly/3MhwCDf.

Madden, B. (2015). «Pedagogical pathways for Indigenous education with/in teacher education». En: *Teaching and Teacher Education* 51, 1-15. Online:https://bit.ly/4778LhO.

Martínez, D., J. Almada e I. Espejel (2016). «¿ Sustentabilidad comunitaria indígena? Un modelo integral». En: *Sociedad y Ambiente* 11, 4-22. Online:https://n9.cl/ydhjw.

Mato, D. (2011). «Universidades indígenas de América Latina: logros, problemas y desafíos». En: *Revista Andaluza de Antropología* 1, 63-854-22. Online:https://n9.cl/j5vrr.

McCarty, T. (2014). «Critical Culturally Sustaining/Revitalizing Pedagogy and Indigenous Education Sovereignty». En: *Harvard Educational Review* 84.1, 101–124. Online:https://bit.ly/3FSrlid.

Mendoza-Castro, C. (2010). «La educación indígena ika, kankuama, nasa, wayúu y mokaná fortalecen la interculturalidad en Colombia». En: *Educación y humanismo* 12.19, 148-176. Online:https://n9.cl/at7xt.

Merlo, M. (2020). «Gestión del conocimiento desde el enfoque socioformativo hacia el desarrollo social sostenible». En: *Ecocience International Journal* 2.2, 10-18. Online:https://n9.cl/11ph9.

Molina, C. (2012). «La autonomía educativa indígena en Colombia». En: *Vniversitas* 124.1, 261-292. Online:https://bit.ly/3FFT6u1.

Mora, L. (2013). «Dimensión ambiental, desarrollo sostenible y sostenibilidad ambiental del desarrollo». En: *Eleventh LACCEI Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology (LACCEI'2013)"Innovation in Engineering, Technology and Education for Competitiveness and Prosperity" August*, págs. 14-16.

Moreno, K. y L. Silva (2021). «La protección jurídica de la soberanía alimentaria de los pueblos indígenas». En: *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar* 5.1, 1-14. Online:https://n9.cl/fxb6e.

Murga-Menoyo, M. y M. Novo (2017). «Sostenibilidad, desarrollo glocal y ciudadanía planetaria: referentes de una Pedagogía para el desarrollo sostenible». En: *Revista Interuniversitaria* 29, 55-78. Online:https://n9.cl/8fuoyg.

Nakata, M. (20007). *Disciplining the Savages: Savaging the Disciplines*. Canberra: Aboriginal Studies Press.

— (2011). «Pathways for Indigenous education in the Australian curriculum framework». En: *The Australian Journal of Indigenous Education* 40, 1-8. Online:https://n9.cl/8fgi0.

Oraee, M. y col. (2017). «Collaboration in BIM-based construction networks: A bibliometric-qualitative literature review». En: *International Journal of Project Management* 35.7, 1288-1301. Online:https://n9.cl/k9wwg.

Osorio-Mejía, M. y J. Lozano-Céspedes (2019). «Prácticas educativas, identidad cultural y concepciones de lo indígena en Colombia: entre la etnoeducación, la in-

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

terculturalidad y la educación propia». Tesis de mtría. Pontificia Universidad Javeriana.

Peralta, P. y col. (2019). «Educación propia de la etnia Mokaná: Experiencia organizacional contemporánea». En: 25.3, 88-100. Online:https://n9.cl/ezpbj.

Robledo, S. y N. Duque-Méndez (2017). «Marketing emprendedor: una perspectiva cronologica utilizando tree of science». En: *Revista Civilizar de Empresa y Economía* 7.13, 113-123. Online:https://n9.cl/tedyi.

Robledo, S. y col. (2022). «Tree of Science with Scopus: A Shiny Application». En: *Issues in Science and Technology Librarianship* 100, Online:https://n9.cl/86c8s.

Rojas-Curieux, T. (2019). «Una mirada a los procesos en torno a la educación con los pueblos indígenas en Colombia». En: *Voces y silencios. Revista Latinoamericana de Educación* 10.1, 9-34. Online:https://n9.cl/w1y2b9.

Ruiz-Cabezas, A. y A. Medina-Rivilla (2014). «Modelo didáctico intercultural en el contexto afrocolombiano: la etnoeducación y la cátedra de estudios afrocolombianos». En: *Indivisa. Boletín de Estudios e Investigación* 14, 6-29. Online:https://n9.cl/8usb6.

Sánchez-Meca, J. y J. Botella (2010). «Revisiones sistemáticas y meta-análisis: Herramientas para la práctica profesional». En: *Papeles del Psicólogo* 31.1, 7-17. Online:https://bit.ly/3QoeOI4.

Sánchez-Moreno, K. y L. Escalera-Silva (2021). «La protección jurídica de la soberanía alimentaria de los pueblos indígenas». En: *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar* 5.1, 1-14. Online:https://n9.cl/imio4.

Sánchez-Otero, M. y col. (2019). «Estrategias Pedagógicas en Procesos de Enseñanza y Aprendizaje en la Educación Superior incluyendo Tecnologías de la Información y las Comunicaciones». En: *Información tecnológica* 30.3, 277-286. Online:https://n9.cl/pons0.

Scully, A. (2020). «Educación basada en la tierra y el lugar crítico en la preparación de maestros canadienses: pedagogías complementarias para el complejo». En: *Investigación pedagógica*, Online:https://bit.ly/3a0YnQG.

Semanate-Quiñonez, H., A. Upegui-Valencia y M. Upequi-Valencia (2022). «Blended learning, avances y tendencias en la educación superior: una aproximación a la literatura». En: *Informador Técnico* 86.1, 46-68. Online:https://n9.cl/6swdg.

Sosa-Provencio, M.A. y col. (2019). «Tenets of Body-Soul Rooted Pedagogy: teaching for critical consciousness, nourished resistance, and healing». En: *Critical Studies in Education* 61.3, 345-362. Online:https://bit.ly/3Mjz24x.

Strauss, A. y J. Corbin (2016). *Bases de la investigación cualitativa: técnicas y procedimientos para desarrollar la teoría fundamental*. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT).

Sutherland, D. J. S. y N. Swayze (2012). «Including Indigenous Knowledges and Pedagogies in Science-based Environmental Education Programs». En: *Canadian Journal of Environmental Education* 17, 80-96. Online:https://bit.ly/3FA5o78.

Tobón, Sergio y col. (2018). «Prácticas pedagógicas: Análisis mediante la cartografía conceptual». En: *Revista Espacios* 39.53, Online:https://bit.ly/3a3CiRy.

Tuck, E. y K. Wayne Yang (2012). «Decolonization is not a metaphor». En: *Decolonization: Indigeneity, Education & Society* 1.1, 1-40. Online:https://bit.ly/46MVhYP.

UNESCO (2021). *Tesauro. Online:https://bit.ly/3NuXHAL*.

Van Eck, N. y L. Waltman (2020). *VOSviewer, software y manual*. *Online:https://n9.cl/iszjf*.

Vásquez, N. (2020). «Educación ambiental de docentes en formación a partir de una propuesta curricular alternativa soportada en la interdisciplinariedad y la responsabilidad ética, política y social». Tesis doct. Universidad Surcolombiana.

Vitonás, A. (2010). «El PEBI, 39 años de construcción de una educación propia en Colombia». En: *Revista Guatemalteca de Educación* 2.3, 261-292. Online:https://bit.ly/3FFT6u1.

Walsh, C. (2009). «Interculturalidad crítica y educación intercultural». En: *Instituto Internacional de Integración del Convenio Andrés Bello (Coordinación), Seminario "Interculturalidad y Educación Intercultural"*.

Walsh, C., L. de Oliveira y V. Candau (2018). «Colonialidade e pedagogia decolonial: Para pensar uma educação outra». En: *Education Policy Analysis Archives* 26, 83-83. Online:https://n9.cl/w0hct.

Williamson, G. (2004). «¿Educación multicultural, educación intercultural bilingüe, educación indígena o educación intercultural?» En: *Cuadernos interculturales* 2.3, 23-34. Online:https://bit.ly/3ubyh4c .

— (2005). *Estudio sobre la educación para la población rural en Chile*. Universidad Alberto Hurtado.

Wolfe, P. (2006). «Settler colonialism and the elimination of the native». En: *Journal of Genocide Research* 8.4, 387-409. Online:https://bit.ly/3Sguvnk.

Zuluaga-Rojas, M. y col. (2016). «Metabolomics and pesticides: systematic literature review using graph theory for analysis of references». En: *Nova* 14.25, 121-138. Online:https://bit.ly/3sbzRp5.

Zuluaga, M. y col. (2022). «Tree of Science-ToS: A web-based tool for scientific literature recommendation. Search less, research more!» En: *Issues in Science and Technology Librarianship* 100, 1-10. Online:https://n9.cl/p8jft.

Zurita-Álava, S., F. Murillo-Calderón e Y. Defaz-Gallardo (2017). «Los saberes culturales en la crianza de los hijos». En: *Revista boletín redipe* 6.6, 97-106. Online:https://n9.cl/h5q24.

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Apéndice

Tabla 3. Tree of Science *(ToS)*.

ToS	Título	Total Citas	Tema
Raíz	Tuck, E., & Yang, K. W. (2012). Decolonization is not a metaphor. Decolonization: Indigeneity, education & society. Disponible en <https://doi.org/10.1080/13504622.2013.877708>	4650	Descolonización
Raíz	Nakata, M. (2010). La interfaz cultural. La revista australiana de educación indígena. Disponible en <https://doi.org/10.34236/rpie.v2i2.8>	761	Investigación pedagógica indígena
Raíz	Ladson-Billings, G. (1995). Toward a theory of culturally relevant pedagogy. Disponible en <https://doi.org/10.3102/00028312032003465>	9257	Investigación pedagógica indígena
Raíz	Gruenewald, DA (2003). Lo mejor de ambos mundos: una pedagogía crítica del lugar. Disponible en <https://doi.org/10.3102/0013189X032004003>	2705	Pedagogía crítica
Raíz	Nakata, M., Nakata, V., Keech, S. y Bolt, R. (2012). Metas descoloniales y pedagogías para los estudios indígenas. Descolonización: indigeneidad, educación y sociedad. Disponible en <https://bit.ly/3Q80JNI>	336	Descolonización.
Raíz	Castagno, AE y Brayboy, BMJ (2008). Escolarización culturalmente receptiva para jóvenes indígenas: una revisión de la literatura. Disponible en <https://doi.org/10.3102/0034654308323036>	1067	Educación indígena.
Raíz	Martin, K. y Mirraboopa, B. (2003). Formas de conocer, ser y hacer: un marco teórico y métodos para la investigación indígena e indigenista. Disponible en <https://doi.org/10.1080/14443050309387838>	1160	Investigación pedagógica indígena
Raíz	París, D. (2012). Pedagogía de sostenimiento cultural: un cambio necesario en la postura, la terminología y la práctica. Disponible en <https://doi.org/10.3102/0013189X12441244>	2966	Investigación pedagógica indígena
Raíz	Wolfe, P. (2006). Colonialismo de colonos y eliminación de los nativos. Disponible en <https://doi.org/10.1080/14623520601056240 >	4488	Descolonización.
Tronco	Bang, M., Curley, L., Kessel, A., Marin, A., Suzukovich III, ES y Strack, G. (2014). Teorías de la rata almizclera, tabaco en las calles y vivir Chicago como tierra indígena. Disponible en <https://doi.org/10.1080/13504622.2013.865113>	221	Descolonización.
Tronco	Madden, B. (2015). Itinerarios pedagógicos para la educación indígena con / en la formación docente. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.tate.2015.05.005>	101	Educación indígena
Tronco	Marker, M. (2006). Después de la caza de ballenas Makah: conocimiento indígena y límites al discurso multicultural. Disponible en <https://doi.org/10.1177/0042085906291923>	179	Conocimiento indígena.
Tronco	Sutherland, D. y Swayze, N. (2012). La importancia del lugar en la educación científica indígena. Disponible en <https://doi.org/10.1177/097340820900400110 >	29	Investigación pedagógica indígena
Tronco	McCarty, T. y Lee, T. (2014). Pedagogía crítica para el sostenimiento, revitalización cultural y la soberanía de la educación indígena. Disponible en <https://doi.org/10.17763/haer.84.1.q83746nl5pj34216>	596	Investigación pedagógica indígena
Tronco	Mackinlay, E. y Barney, K. (2014). Posibilidades desconocidas y desconocidas: aprendizaje transformador, justicia social y pedagogía descolonizadora en los estudios indígenas australianos. Disponible en <https://doi.org/10.1177/1541344614541170>	81	Descolonización.
Tronco	Martin, G., Nakata, V., Nakata, M. y Day, A. (2017). Promover la persistencia de los estudiantes indígenas a través de la docencia en la Interfaz Cultural. Disponible en <https://doi.org/10.1080/03075079.2015.1083001>	48	Conocimiento indígena

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Tronco	Harrison, N. y Skrebneva, I. (2020). El país como pedagógico: promulgación de una base australiana para una pedagogía culturalmente receptiva. Disponible en <https://doi.org/10.1080/00220272.2019.1641843>	11	Investigación pedagógica
Tronco	Bishop, R., Berryman, M., Cavanagh, T. y Teddy, L. (2009). Te kotahitanga: abordar las disparidades educativas que enfrentan los estudiantes maoríes en Nueva Zelanda. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.tate.2009.01.009>	474	Investigación pedagógica
Tronco	Yunkaporta, T. y McGinty, S. (2009). Recuperación del conocimiento aborigen en la interfaz cultural. Disponible en <https://doi.org/10.1007/BF03216899>	182	Conocimiento indígena
Hoja	Dreamson, N. (2018). Alianzas pedagógicas entre culturas indígenas y no dualistas: Educación metacultural. Disponible en <https://doi.org/10.4324/9780429458811>	6	Investigación pedagógica indígena
Hoja	Dreamson, N. (2016). Reinventar la educación intercultural: un manifiesto metafísico para repensar la diversidad cultural. Disponible en <https://Reinventing+Intercultural+Education>	12	Investigación pedagógica indígena
Hoja	Burgess, C., Tennent, C., Vass, G., Guenther, J., Lowe, K. y Moodie, N. (2019). Una revisión sistemática de las pedagogías que apoyan involucra y mejoran los resultados educativos de los estudiantes aborígenes. Disponible en <https://doi.org/10.1007/s13384-019-00315-5>	12	Investigación Pedagógica
Hoja	Scully, A. (2020). Educación basada en la tierra y el lugar crítico en la preparación de maestros canadienses: pedagogías complementarias para el complejo. Disponible en <https://bit.ly/3a0YnQG>	6	Investigación pedagógica indígena
Hoja	Burgess, C., Bishop, M. y Lowe, K. (2020). Descolonización de la educación indígena: el caso de la tutoría cultural para apoyar la reproducción del conocimiento indígena. Disponible en <https://doi.org/10.1080/01596306.2020.1774513>	5	Descolonización
Hoja	Weuffen, SL, Cahir, F. y Pickford, AM (2017). La centralidad de los talleres culturales aborígenes y el aprendizaje basado en la experiencia en un curso de formación inicial para profesores: un estudio de caso regional de la Universidad de Victoria. Disponible en <https://doi.org/10.1080/07294360.2016.1242557>	9	Investigación pedagógica indígena
Hoja	Sosa-Provencio, MA, Sheahan, A., Desai, S. y Secatero, S. (2020). Principios de la pedagogía arraigada en el cuerpo y el alma: enseñanza para la conciencia crítica, la resistencia nutrida y la curación. Disponible en <https://doi.org/10.1080/17508487.2018.1445653>	13	Investigación Pedagógica
Hoja	Hino, N. (2018). Educación EIL para el círculo en expansión: un modelo japonés. Disponible en <https://doi.org/10.4324/9781315209449>	28	Investigación Pedagógica
Hoja	Hino, N. (2020). Educación ELF para el contexto japonés. Disponible en <https://doi.org/10.1007/978-3-030-33288-4_2>	1	Investigación Pedagógica
Hoja	Higgins, M. (2014). Pedagogía y pedagoga descolonizadora: Educación científica a través de la videografía participativa y reflexiva. Disponible en <https://doi.org/10.1080/14926156.2014.903321>	35	Descolonización

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

La Granja:
Revista de
Ciencias de la Vida

pISSN:1390-3799; eISSN:1390-8596

http://doi.org/10.17163/lgr.n39.2024.02

Número Especial/ Special Issue

Desarrollo Sostenible

CC BY NC SA

Disposición a Pagar por un sistema integral de Residuos Sólidos Urbanos en poblaciones semi-urbanas

Willingness to Pay for Urban Solid Waste integral system in Semi-Urban Populations

Francisco Iván Hernández Cuevas*[1], Diana Estefania Castillo Loeza[2], Javier Becerril García[3], y María Pía Mc Manus Gómez[4]

[1]*Escuela de Administración, Turismo y Mercadotecnia de la Universidad Marista de Mérida, México.*
[2]*Escuela de Administración de Recursos Naturales de la Universidad Marista de Mérida, México.*
[3]*Facultad de Economía de la Universidad Autónoma de Yucatán, México.*
[4]*Escuela de Administración de Recursos Naturales de la Universidad Marista de Mérida, México.*

*Autor para correspondencia: fhernandez@marista.edu.mx

Manuscrito recibido el 29 de enero de 2020. Aceptado, tras revisión, el 20 de febrero de 2020. Publicado el 1 de marzo de 2024.

Resumen

La transición de lo rural a lo semiurbano en Yucatán ocurre principalmente en las cabeceras municipales, y trae consigo problemas de gestión de los residuos. Las autoridades municipales son las encargadas del Manejo Integral de los Residuos Sólidos Urbanos (MIRSU); pero en últimos años, la asociación entre el sector público y el privado para la gestión de los residuos resulta una estrategia eficaz. Existen pocos estudios sobre el MIRSU en zonas rurales o semiurbanas y la disposición a pagar de los usuarios, información que ayudaría a los creadores de política pública a diseñar planes y programas adecuados para su gestión. Por lo tanto, el objetivo de este estudio es determinar los factores socioeconómicos asociados a la disposición a pagar por el MIRSU de los usuarios de municipios semiurbanos de Yucatán. Se realizaron 1,144 encuestas en 6 localidades semiurbanas de Yucatán, los datos se analizaron mediante estadística descriptiva e inferencial con un modelo econométrico de regresión Tobit. El 69,75 % de los usuarios encuestados declararon estar dispuestos a pagar por el manejo integral de los residuos sólidos un monto promedio de 17,65 pesos mexicanos (0,85 dólares estadounidenses). La disposición a pagar disminuye cuando predomina el idioma maya, y mientras menos activos físicos y habitaciones tenga el hogar. Existen elementos culturales y sociales arraigados en la recolección de residuos sólidos, este sistema integral puede ir acompañado de otro tipo de incentivos económicos para modificar el comportamiento de los consumidores hacia algo más beneficioso para el medio ambiente, tal como el ingreso familiar.

Palabras clave: Residuos Sólidos Urbanos (RSU), áreas semi rurales, Disposición a Pagar (DAP), Modelo Tobit.

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Abstract

In Yucatan, the transition from rural to semi-urban communities has occurred mainly in the municipality seats; this transition comes with the problems of waste management. The municipalities oversee the Integral Urban Solid Waste Management (IUSWM); but in recent years, the public-private partnership for waste management has proved to be an effective strategy. There are few studies on the IUSWM in rural or semi-urban areas and the users' willingness to pay, information that would help public policymakers to design adequate plans and programs for its management. Therefore, the purpose of this study is to determine the socioeconomic factors associated with the willingness to pay for the IUSWM of users in semi-urban municipalities of Yucatan. A total of 1,144 interviews were conducted in 6 semi-urban localities in Yucatan, and the data were analyzed using descriptive and inferential statistics with a Tobit regression econometric model. 69.75% of the surveyed users declared that they were willing to pay an average of 17.65 Mexican pesos (0.85 U.S. dollars) for the integral urban solid waste management. The willingness to pay decreases when the Mayan language predominates among the member of the household, and when they have fewer tangible assets and rooms. There are cultural and social factors rooted in solid waste collection, this integrated system may be accompanied by other types of economic incentives to modify consumers' behavior towards something more beneficial for the environment, such as the homes' income.

Keywords: Urban Solid Waste (USW), Semi-rural area, Willingness to Pay (WTP), Tobit model.

Forma sugerida de citar: Hernández Cuevas, F., Castillo Loeza, D., Becerril García, J. y Mc Manus Gómez, M. (2024). Disposición a Pagar por un sistema integral de Residuos Sólidos Urbanos en poblaciones semi-urbanas. La Granja: Revista de Ciencias de la Vida. Vol. 39(1):27-42. http://doi.org/10.17163/lgr.n39.2024.02.

IDs Orcid:

Francisco Iván Hernández Cuevas: https://orcid.org/0000-0002-1310-7574
Diana Estefania Castillo Loeza: https://orcid.org/0000-0002-0363-5883
Javier Becerril García: https://orcid.org/0000-0003-3785-1469
María Pía Mc Manus Gómez: https://orcid.org/0000-0002-3031-3652

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

1 Introducción

El problema de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) está aumentando a nivel mundial debido al crecimiento de la población y al cambio en los patrones de consumo. Según Kaza y col. (2018), en todo el mundo se generan 242 millones de toneladas de residuos plásticos, y en 2016 se produjeron 1.600 millones de toneladas de emisiones de gases de efecto invernadero equivalentes a dióxido de carbono (CO_2) por la gestión de residuos sólidos. Si no hay ninguna mejora en la generación de residuos sólidos, las emisiones aumentarán un 62,5% en el 2050.

En 2017, en México se produjeron 102 895,00 toneladas diarias de residuos, de esa cantidad el 83,93% se recolectó, y el 78,54% se destinó a sitios de disposición final, reciclando sólo el 9,63% (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2017). La información oficial (Fig. 1) a nivel nacional, estatal y local sobre la generación de residuos sólidos es escasa y desactualizada (el último dato oficial se registró en 2012). No obstante, se observa un comportamiento explícito en el crecimiento económico del país. El aumento del gasto medio en consumo privado de las familias ha provocado un incremento constante de los residuos y de la generación de los mismos. Incluso en tiempos de crisis económica (2009), la generación de residuos sólidos urbanos continuó incrementando, lo que podría atribuirse a la pausa económica generada por las acciones de mitigación de la pandemia del COVID-19 y que ahora con la reapertura económica podría tener un efecto más significativo en términos de contaminación.

La producción de RSU está vinculada a las actividades en los hogares (Diario Oficial de la Federación, 2003), por lo que su aumento también está relacionado con los patrones de consumo de los hogares y el crecimiento de la población. Las investigaciones muestran cambios en los patrones de consumo; por ejemplo, se realizó un estudio en la isla de Creta para identificar la composición de los residuos, y los resultados indicaron un cambio en los patrones de consumo, principalmente debido al aumento de los materiales de almacenamiento en comparación con la disminución de los residuos orgánicos (Gidarakos, Havas y Ntzamilis, 2006). Por otro lado, a medida que la población crece en una región, es necesario establecer una forma más organizada de gestión de los residuos para mantener los aspectos sanitarios generales (Seadon, 2006).

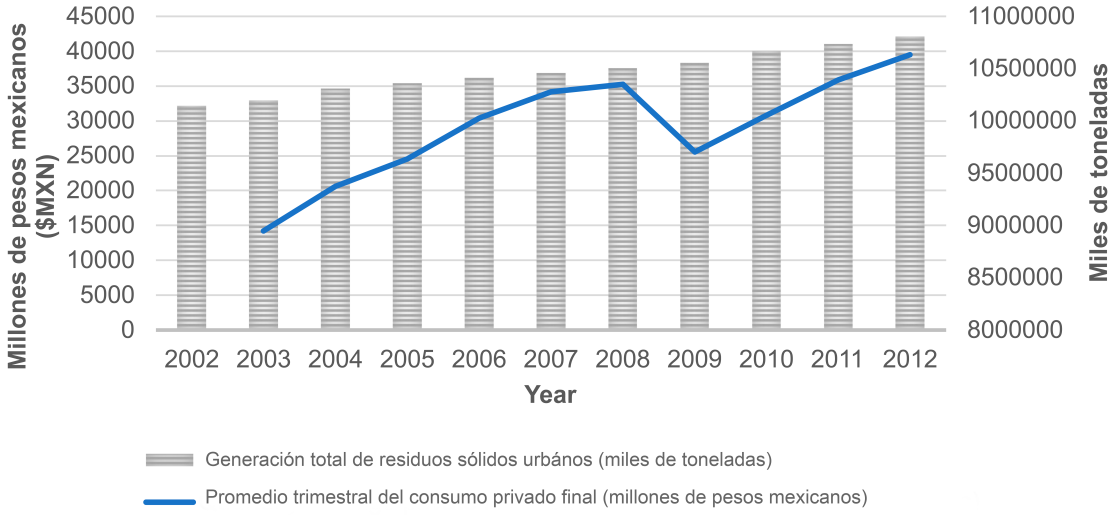

Figura 1. Generación de residuos sólidos urbanos y consumo privado en México.
Fuente: Elaboración propia con base a los datos de la Secretaría de Desarrollo Social (2013).

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

La gestión adecuada en los niveles de RSU todavía no se ha logrado (Marín García y Quintanilla Jerezano, 2007). Algunos RSU depositados en los vertederos tienen un valor residual, como el papel, el PET, el cartón, el cartón de leche, el metal, entre otros. Sin embargo, este valor se pierde cuando no son reutilizados o reintegrados a la economía (Taboada-González y col., 2013). La mala gestión de los RSU puede crear efectos nocivos como la contaminación del suelo, el aire y el agua, la pérdida de biodiversidad y los riesgos para la salud (Huamaní Montesinos, 2017; Srivastava y col., 2015). La gestión adecuada de los RSU es un tema que impacta en las diferentes dimensiones de la sostenibilidad (Silva, Prietto y Korf, 2019); por lo tanto, es importante que después de recoger datos sobre los RSU, los hallazgos sean utilizados por los responsables políticos para desarrollar o mejorar una adecuada Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos (GIRSU).

En México, la *Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos* de 2003 señala que la GIRSU es un sistema que se encarga de las acciones para reducir, reutilizar y reciclar los residuos producidos, así como su recolección, almacenamiento y disposición final, siguiendo los objetivos de saneamiento, restauración y conservación del medio ambiente. Sin embargo, los sectores en los que se generan residuos sólidos son el industrial, el gubernamental, el institucional y el sanitario (Srivastava y col., 2015).

No existe una definición exacta de la GIRSU, ya que cambia según el país; además, la GIRSU va más allá de los desechos finales. Tchobanoglous y Kreith (2002) sugieren que se puede considerar como a la selección y aplicación de prácticas, tecnologías y programas de gestión adecuados para lograr los objetivos. Las ventajas de tener una GISRU en un país van más allá de la preservación de la salud de la población. También implica la disminución del uso de recursos naturales y de la contaminación por vertido de residuos no tratados, e indirectamente, el ahorro de energía (Hui y col., 2006).

El problema de la gestión de los residuos sólidos también está presente hoy en día en las zonas urbanas y semiurbanas, debido al aumento de la urbanización. Por ejemplo, en las zonas rurales de la India, los residuos se vierten en lugares inadecuados (bordes de las carreteras, terrenos baldíos, etc.), lo que es peligroso para la salud de los residentes de estas zonas y el medio ambiente; no hay separación de residuos, y aunque los residuos orgánicos se destinan a la alimentación de los animales, los cambios en los patrones de consumo han aumentado el uso de materiales plásticos que se eliminan en los vertederos (Vij, 2012). En las zonas rurales de Egipto, los residuos sólidos se suelen verter en desagües y canales, en vertederos abiertos o se queman (El-Messery, Ismail y Arafa, 2009).

Tabla 1. Generación de residuos sólidos urbanos por tipo de área

Año	Generación nacional de residuos sólidos urbanos (miles de toneladas)	Generación de residuos sólidos urbanos en Yucatán (miles de toneladas)	Generación de residuos sólidos en localidades rurales o semiurbanas (miles de toneladas)
2002	32 173,60	459,52	4 774,20
2003	32 915,70	470,85	4 793,00
2004	34 604,00	496,00	4 964,00
2005	35 405,00	509,00	5 326,00
2006	36 135,00	522,00	5 088,00
2007	36 865,00	551,00	5 021,00
2008	37 595,00	562,00	4 540,00
2009	38 325,00	573,00	4 561,00
2010	40 058,75	591,30	4 639,50
2011	41 062,50	605,90	4 704,30
2012	42 102,75	620,50	4 726,00

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Secretaría de Desarrollo Social (2013).

LA GRANJA: *Revista de Ciencias de la Vida* 39(1) 2024:27-42.
©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

En las últimas décadas, las zonas rurales en México también se han transformado de rurales a urbanas y semiurbanas, debido a un crecimiento demográfico. Esta transición de lo rural a lo urbano viene acompañada de los problemas de manejo de los RSU, así como del cambio en los hábitos de consumo. El Estado de Yucatan[1] no está exento y ha experimentado esta transformación sobre todo en las seats[2], municipales, algunas de las cuales han alcanzado el tamaño de zonas semiurbanas. Desafortunadamente, el problema de los RSU está presente en ellos (como el creciente uso de materiales desechables y peligrosos), y se agrava cuando las comunidades no cuentan con servicios adecuados de recolección de basura. Esto se observa en la información reportada por la Secretaría de Desarrollo Social (2013) (Tabla 1), donde se muestra un crecimiento en la generación de residuos sólidos urbanos en zonas rurales o semiurbanas. El estado de Yucatán también ha registrado incrementos en el volumen de generación de RSU, obteniendo un total de 620 mil toneladas para el año 2012.

El único municipio del estado de Yucatán que cuenta con un relleno sanitario es Mérida, y los demás carecen de un relleno adecuado. En consecuencia, los residuos en las localidades rurales y semirurales se queman y arrojan en rellenos sanitarios, hoyos en el suelo y calles. Entre los problemas causados por el mal manejo de los RSU se encuentran la contaminación ambiental (atmosférica, edáfica, hídrica, visual), los malos olores, los roedores y las plagas, y temas que ponen en peligro la salud de los habitantes (Canul Bacab y May Hoil, 2016). En Yucatán se han desarrollado iniciativas debido a los RSU, un ejemplo de estas iniciativas es que todos sus municipios cuentan con un Plan de Manejo de Residuos Sólidos (Secretaría de Desarrollo Sustentable, 2021). Sin embargo, la aplicación de estos planes requiere de inversión, innovación y la vinculación entre los sectores sociales, privados y públicos para comenzar a tener efectos positivos en la reducción de los RSU.

En México -según el artículo 115 de la Constitución Política- los municipios se encargan de la limpieza, recolección, tratamiento y disposición final de los residuos. Sin embargo, México ha experimentado un cambio notable en los servicios públicos, ya que cada vez hay más servicios privados. Esto incluye el suministro de agua potable, el alumbrado público y los servicios de recolección de residuos (Couto Benítez, Hernández y Sarabia, 2012). La participación del sector privado se ha convertido en una alternativa de solución al problema de la gestión de residuos, principalmente en las zonas urbanas (Couto Benítez, Hernández y Sarabia, 2012). Algunos estudios abordan la disposición de la población a pagar por el sistema de recolección de basura, así como los factores que influyen en esta decisión (Kayamo, 2022; Koford y col., 2012; Song, Wang y Li, 2016).

Los estudios sobre la gestión de los RSU se centran en las zonas urbanas que tienen una gran población (en México lo urbano supera a 15.000, y lo rural es menor a 2.500 habitantes, y el intermedio: semiurbano). Sin embargo, es probable que estos resultados no se apliquen en zonas semiurbanas, ya que son más pequeñas (Friesen-Pankratz y col., 2011).

Por lo tanto, existe poca información sobre la recolección y disposición final de los RSU en zonas rurales y semiurbanas, así como de los factores que incentivan a estos habitantes a adquirir un servicio de recolección de residuos (RSU). Por ello, el propósito de este estudio es determinar los factores socioeconómicos asociados a la disposición a pagar para crear un sistema de gestión integral de residuos sólidos (SGSI) en ciudades semiurbanas de Yucatán.

2 Materiales y Métodos

En este estudio se utilizó un enfoque cuantitativo con diseño no experimental y de tipo transversal mediante el análisis de estadísticas descriptivas e inferenciales a través de un modelo econométrico de regresión truncada (Tobit). Los datos se recogieron en un solo periodo entre enero y marzo de 2021.

El diseño del estudio consideró tener representatividad espacial de las ciudades semiurbanas en los municipios del estado de Yucatan[3], los cuales fue-

[1] Uno de los 32 estados de México.

[2] Es una ciudad o sede del gobierno municipal. México tiene tres niveles de gobierno: Federal, Estatal y Municipal, y 32 Estados y 2.471 municipios.

[3] Yucatán tiene 106 municipios.

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

ron seleccionados de acuerdo con su distribución espacial. El estado se dividió en seis zonas, considerando la zona centro, noreste, noroeste, sureste y suroeste. Los municipios seleccionados según el criterio de representatividad fueron: Halacho, Izamal, Muna, Peto, Tekax y Tizimín, y las ciudades semiurbanas seleccionadas dentro de ellos son sus cabeceras municipales; ambas se presentan en la Figura 2: el municipio con color y la ciudad semiurbana con puntos.

El tamaño de la muestra se calculó para cada municipio con un 95% de confianza, 10% de error y, la respuesta positiva del 90% y la negativa del 10%. Se recolectaron 1144 entrevistas (Tabla 2), las cuales fueron suministradas y contestadas de manera física y personal (cara a cara), respetando el consentimiento informado respecto al uso de la información y todas las medidas de seguridad y distancia para evitar la propagación del COVID-19.

Tabla 2. Tamaño de la muestra del área de estudio

Municipio	Habitantes	Tamaño de la muestra
Halacho	4747	208
Izamal	9640	206
Muna	3029	205
Peto	5599	102
Tekax	9606	210
Tizimín	17705	213
Total		1144

Fuente: Elaboración propia con base en INAFED (2021).

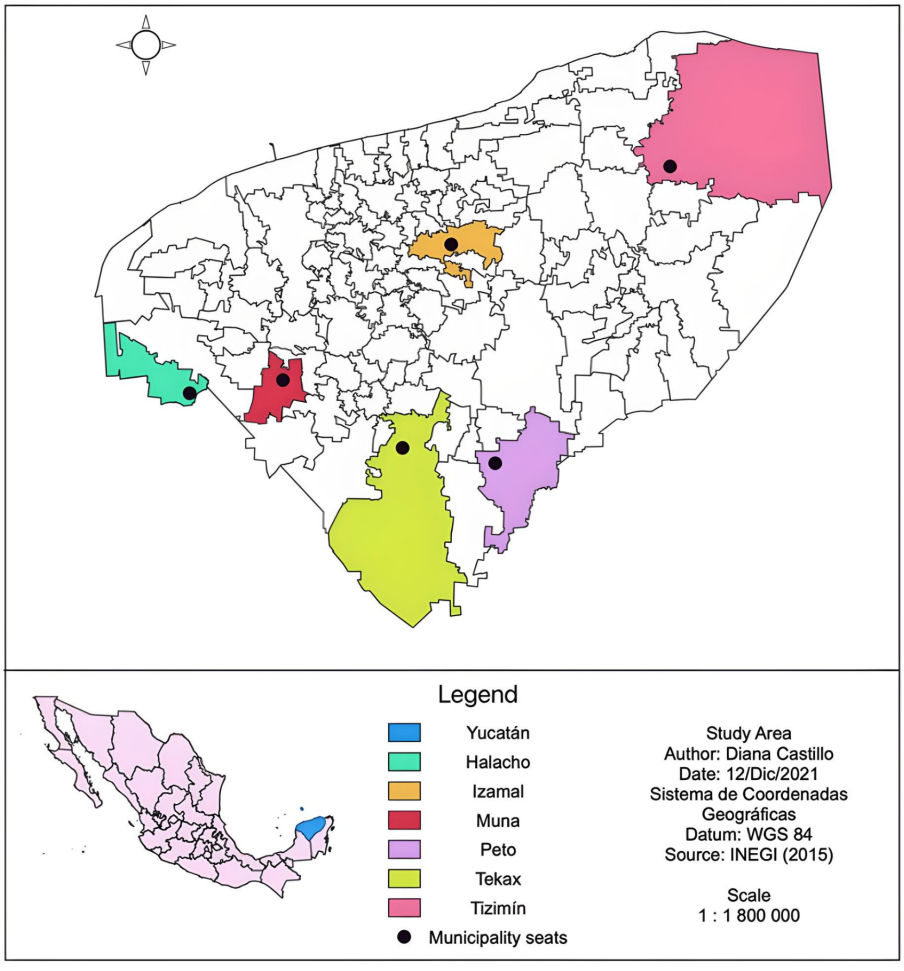

Figura 2. Área de estudio
Fuente: Elaboración propia adaptada de INEGI (2015).

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

El instrumento utilizado en el presente estudio fue una encuesta en los hogares, la cual estuvo conformada por un total de 6 secciones que incluyeron: aspectos sociodemográficos de los integrantes del hogar, información relacionada con las actividades económicas principales y secundarias que realizan, elementos sobre las características físicas de la vivienda, los programas de política pública que recibe el hogar, los activos físicos con los que cuenta la familia y una sección relacionada con la generación de residuos sólidos urbanos. Toda la información se obtuvo y se almacenó en hojas de cálculo y posteriormente se importó al software estadístico STATA 17® para realizar los análisis estadísticos descriptivos y econométricos.

2.1 Método de valoración económica

Se utilizó el método de preferencias para estimar la disposición total a pagar por la creación de un sistema integral de recogida de residuos sólidos urbanos. En particular, se utilizó el método de valoración contingente (MVC), que ofrece un enfoque más directo al entrevistado (Tietenberg y Lewis, 2018). Un método CVM proporciona información relativa a la distribución de la DAP para un cambio propuesto en un bien ambiental (en este escenario, una reducción de la contaminación generada para los residuos sólidos urbanos) y su objetivo es medir el valor monetario de un individuo para este elemento. El acto de valoración implica un contraste entre dos situaciones, una con el artículo y otra sin él, por lo que las respuestas revelan un límite superior (en el caso de una respuesta "no") o un límite inferior (en el caso de una respuesta "sí") (Tietenberg y Lewis, 2018; Carson y Hanemann, 2006).

Los antecedentes teóricos del método están compuestos por la estructura de la función de utilidad (Ferreira y Marques, 2015). El MCV se apoya en la probabilidad de respuesta a la encuesta bajo el supuesto de que un individuo maximiza su utilidad, la función de distribución acumulada de la DAP, G_c, y la correspondiente función de densidad de probabilidad, g_c, depende de la forma de las preguntas de la encuesta (Hoyos y Mariel, 2010). Se utilizó un formato de pregunta abierta en el que se pidió a los individuos que declararan directamente su máxima DAP, A, la probabilidad de que la DAP del individuo sea igual a A, es:

$$Pr\left(DAP = A\right) \equiv g_c\left(A\right) \tag{1}$$

La obtención de la distribución de la DAP para un formato de pregunta abierta supone una regresión lineal sobre algunas covariables (Zy) y un término aleatorio de distribución normal (ε), por lo que la DAP también se distribuye normalmente (Hoyos y Mariel, 2010):

$$DAP = \mu_{WTP} + \varepsilon = Z_y + \varepsilon \tag{2}$$

2.2 Especificaciones del modelo de regresión Tobit para la DAP ($)

Se obtuvo un valor monetario de la disposición a pagar (DAP) de las entrevistas. Sin embargo, esta variable dependiente presenta una característica particular ya que está censurada a la "izquierda" en 0 para todas las respuestas de los individuos que decidieron no considerar a DAP, de tal manera, que no se cobra por este evento. Adicionalmente, también se censura a la "derecha", ya que los valores mayores a cero en la DAP tienen un límite de $200 MX[4], es decir, ninguno de los entrevistados tuvo una DAP mayor a $200 MXN mensuales por la creación del SGSI.

Por lo tanto, el modelo Tobit (Tobin, 1958) es la alternativa más adecuada al modelo de regresión por mínimos cuadrados ordinarios (MCO). La falta de capacidad para reconocer la censura en la distribución de las respuestas en el modelo MCO provoca parámetros de estimación inconsistentes y sesgados (Del Saz-Salazar, Feo-Valero y Vázquez-Paja, 2020; Maddala, 1983).

El modelo de regresión Tobit puede definirse de la siguiente forma:

$$y_i^* = x_i^{'}\beta + \varepsilon_i \tag{3}$$

Donde y_i^* es la variable latente dependiente, x_i, es la i-ésima fila de la matriz de datos de n × (p+1) con una matrix X y p variables explicativas, β es un vector (p+1) × 1 de coeficientes y ε_i es el término de error que se distribuye independientemente con media 0 y varianza σ^2. Existen diferentes tipos de censura como la izquierda, la derecha, la doble, la central y la progresiva (Toker y col., 2021).

[4]Tasa de cambio de $ 20.73 peso mejicano por $ 1 US dólar.

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

La estimación del modelo Tobit se basa en el nivel de la regresión lineal ordinaria (Greene, 2018), donde la probabilidad logarítmica para el modelo de regresión censurado es:

$$\ln L = \sum_{y_t>0} -\frac{1}{2}\left[\ln(2\pi) + \ln\sigma^2 + \frac{\left(y_i - x_i'\beta\right)^2}{\sigma^2}\right] + \sum_{y_t=0} \ln\left[1 - \Phi\left(\frac{x_i'\beta}{\sigma}\right)\right] \quad (4)$$

Donde las dos partes corresponden a la regresión lineal para las observaciones no limitadas y las probabilidades relevantes para la observación límite, respectivamente (Greene, 2018).

Tabla 3. Características sociodemográficas de los hogares

Variable	Media	Desviación estándar
Jefe de familia		
Sexo (1=hombre)	0,41	0,49
Edad	49,70	17,01
Habla maya (1=sí)	0,57	0,49
Años de escolaridad	8,78	4,01
Características de los hogares		
Tamaño de la familia	2,51	1,54
Número de habitaciones	2,00	1,06
Tiene un teléfono móvil (1=sí)	0,89	0,31
Tiene una bicicleta (1=sí)	0,36	0,48
Tiene auto (1=sí)	0,14	0,35
Ingresos totales anuales ($MXN)	56 385,78	66 114,94

Fuente: Datos recogidos, n= 1.144 hogares

3 Resultados

La tabla 3 muestra las características sociales, económicas y demográficas de los habitantes y sus hogares (HH), donde el 41% de los jefes de hogar son hombres, el promedio de edad es de alrededor de 50 años, y la mayoría de ellos (57%) hablan el idioma local: Maya. La mayoría de los jefes de hogar no han terminado la escuela secundaria (8,78 años de estudio). Los ingresos anuales son de aproximadamente 2.720 dólares per cápita.

En la figura 3 se identifican los residuos sólidos urbanos generados con mayor frecuencia en los hogares entrevistados, destacan: restos de huesos y pieles de animales (93,53%), botellas de PET (93%), envoltorios de alimentos (92,48%), productos de limpieza (92,3%), restos de comida (90,38%), bombillas (89,07%), plástico en general (87,3%), latas (84,23%), papel higiénico (83,3%) y, madera (82,25%). Existe un gran valor en el reciclaje o en los mercados de la economía circular dentro de los residuos generados por los hogares como el PET, las latas, la madera y los envoltorios de alimentos. Este factor es vital ya que el sistema de gestión integral de residuos debe contemplar la reutilización de este tipo de residuos.

La figura 4 presenta la distribución de los RSU generados en los hogares entrevistados. La recolección de residuos se encarga de una parte de los RSU, sin embargo, la disposición final de otros residuos es la quema, la venta, el reciclaje, el compostaje, la utilización para la alimentación de animales, los vertederos, calles, pozos y huecos en la tierra. De acuerdo con los resultados obtenidos en las viviendas, se pueden destacar los siguientes elementos:

- Quema de basura: El 24% de los hogares queman papel higiénico; el 24%, madera o residuos de jardinería; el 17%, envoltorios de alimentos; el 16%, cartón; y el 9%, productos domésticos.
- Recogida de residuos: El 86% de los hogares desechan bombillas para la recogida de basura; el 81%, productos domésticos; el 74%, papel higiénico; el 73%, envoltorios de alimentos; el 65%, tetrapak; el 58%, plástico en general; el 56%, vidrio; el 54%, medicamentos; el 59%, latas; el 47%, pilas; el 44%, electrodomésticos; el 41%, cartón; el 40%, botellas plásticas; en menor medida, entre otros.
- Venta: los hogares entrevistados declaran vender parte de sus residuos a los RSU. El 22% vende botellas plásticas; el 19% metal; el 15%

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

latas; el 11% aluminio; el 6% plástico en general; y el 4% tetrapak.

- El compost: Los RSU son útiles para producir compost. Los 3 RSU más utilizados para este fin son los residuos de madera o de jardinería en el 20% de los hogares; el estiércol en el 11% y, por último, los restos de comida en el 7%.
- Alimento para animales: Los RSU pueden utilizarse como alimento para animales, especialmente en los hogares rurales que crían animales de traspatio. Los principales 3 utilizados para ello son huesos y pieles de animales en el 60% de los hogares, restos de comida en el 49% y nixtamal en el 9%.

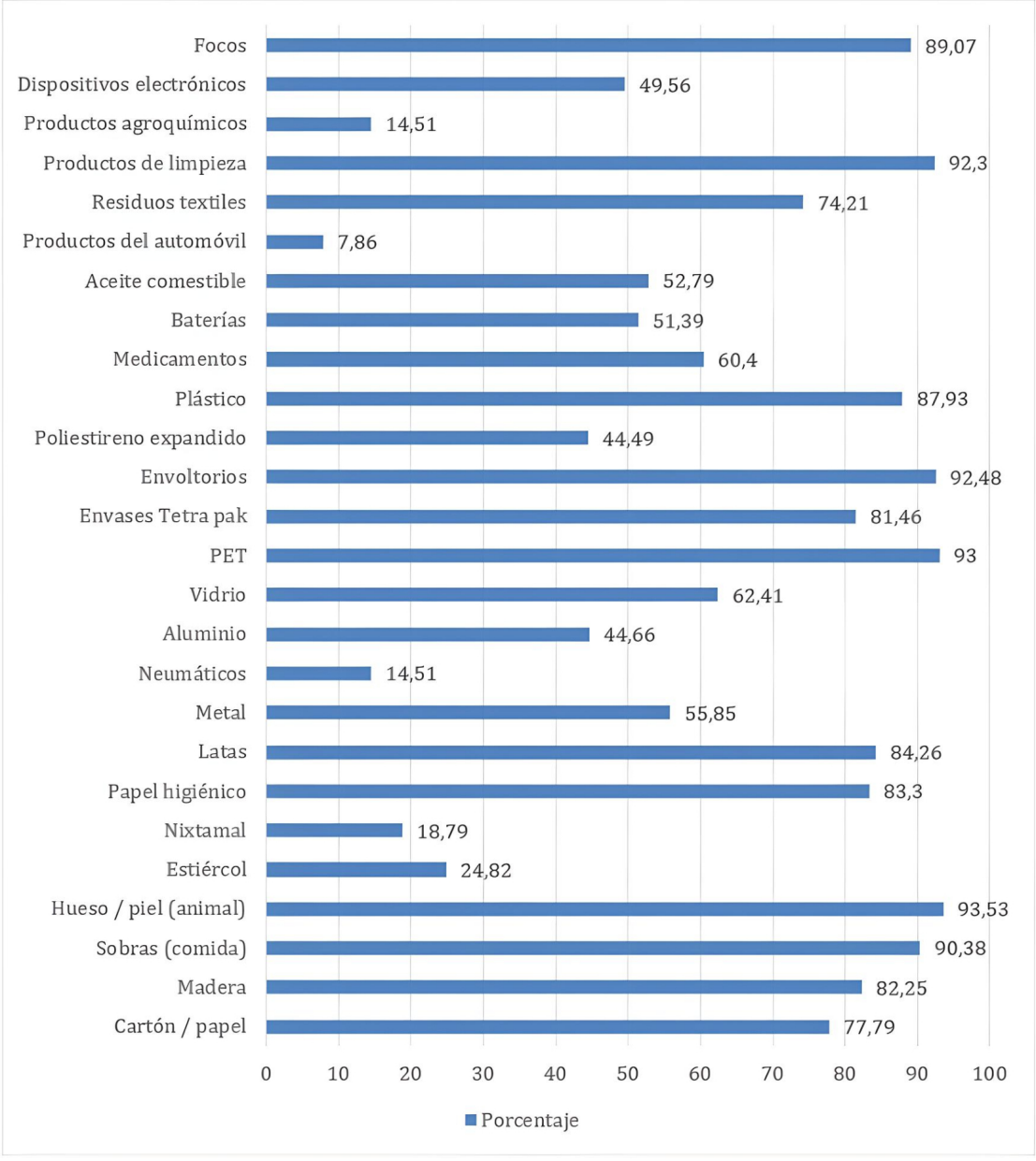

Figura 3. Porcentaje de hogares que generan residuos sólidos urbanos
Fuente: Elaboración propia a partir de los datos recogidos

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

En la descripción de los grupos por su disposición a pagar por la creación de un sistema de Recogida Integral de Residuos Sólidos Urbanos en los municipios, los resultados fueron los siguientes: El 69,75% de los hogares entrevistados declaró estar dispuesto a pagar. El monto promedio de pago es de 17,65 pesos mexicanos (0,85 dólares americanos).

Los aspectos sociodemográficos que diferencian a los hogares por su disposición a pagar se describen en la Tabla 4. Los resultados muestran que el hecho de hablar maya (t = 3,33), los años de educación (t = 2,44), el número de habitaciones en la casa (t = 4,99), la posesión de un teléfono celular (t = 2,59), de una bicicleta (t = 4,38) y de un automóvil (t = 3,89) diferencian a estos grupos. En este sentido, se observa que los hogares donde predomina la lengua maya en general no están dispuestos a pagar, así como los hogares que cuentan con menos activos físicos del hogar.

La media de la DAP varía de un municipio a otro. Se puede observar en la Figura 5 que en Muna, la DAP apenas supera los 10 pesos y es la más baja de todos los municipios estudiados. Mientras que Halacho y Tekax están por debajo de los 15 pesos, pero llegan a los 10. La DAP en Peto está por encima de 15, pero por debajo de 20 pesos. La DAP en Izamal supera los 20 pesos, pero la media más alta de la DAP está en Tizimín con 26,90 pesos.

La Figura 6 muestra la tasa de superveniencia, donde se puede observar las frecuencias de aparición del resto del valor monetario asignado por los entrevistados.

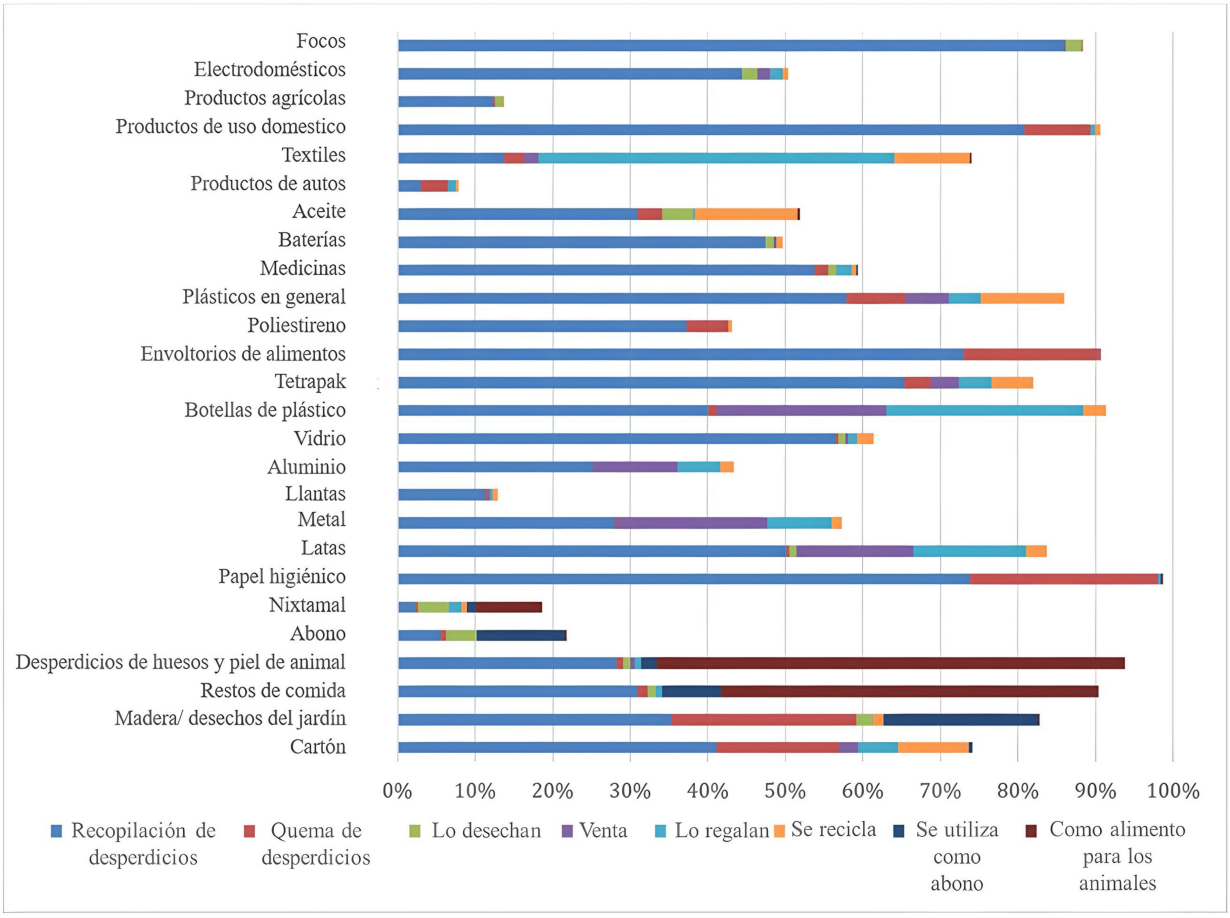

Figura 4. Destino de los residuos sólidos urbanos generados en los hogares (%)
Fuente: Elaboración propia a partir de los datos recogidos

LA GRANJA: *Revista de Ciencias de la Vida* 39(1) 2024:27-42.
©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Los hogares que declararon no estar dispuestos a pagar por un sistema integrado de recogida de residuos sólidos coincidieron en las siguientes razones:

- Los ingresos de los hogares son insuficientes.
- No hay cultura de pagar la recogida de basuras.
- Es un gasto adicional para el hogar.
- Ya existe una recogida de residuos gratuita.
- Desconfianza por parte de los consumidores porque el sistema actual no funciona correctamente.

El modelo Tobit se aplicó con la información descriptiva para identificar los factores socioeconómicos que influyen en la probabilidad de una cantidad monetaria más significativa en la disposición a pagar. En total, se identificaron seis variables estadísticamente significativas. Algunas de esas variables son el hecho de que el jefe de familia hable maya y que tenga una bicicleta en casa como activo, lo que reduce las probabilidades de hacer un pago mayor. Por otro lado, los años de educación y las variables asociadas a las mejoras materiales en la vivienda, como un mayor número de habitaciones, tener un teléfono celular y un automóvil afectan positivamente las probabilidades de tener una mayor disposición de pago. Los resultados se muestran en la Tabla 5.

Tabla 4. Aspectos sociodemográficos de los hogares entrevistados en relación con su DAP

Variable	El hogar está dispuesto a pagar (n=798)	El hogar no está dispuesto a pagar (n=346)	| t |
Jefe de familia			
Sexo (1=hombre)	0,41	0,42	0,44
Edad	49,34	50,52	1,08
Habla maya (1=sí)	0,54	0,65	**3,33**
Educación	8,97	8,34	**2,44**
Aspectos del hogar			
Tamaño de la familia	2,48	2,57	0,91
Número de habitaciones	2,10	1,76	**4,99**
Tiene teléfono móvil (1=sí)	0,90	0,85	**2,59**
Tiene una Bicicleta (1=sí)	0,32	0,45	**4,38**
Tiene auto (1=sí)	0,17	0,08	**3,89**
Ingreso total anual per cápita ($MXN)	3 025,23	2 729,95	1,33

Fuente: datos recogidos.

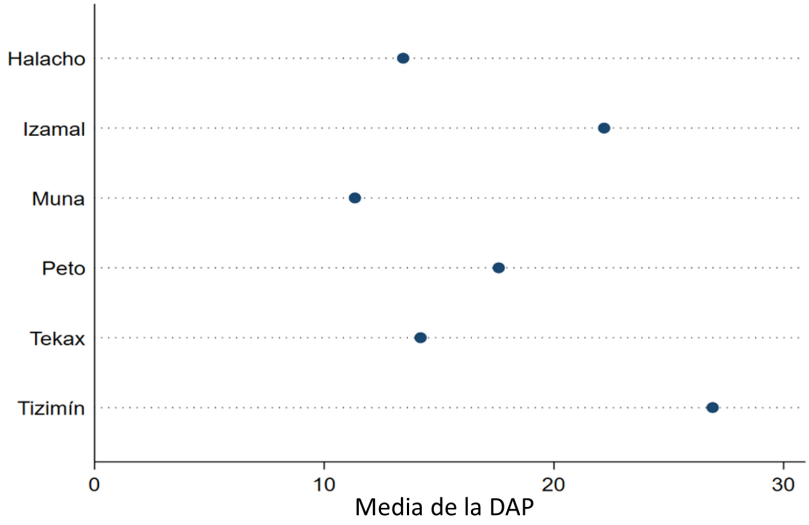

Figura 5. Media de las DAP de los municipios estudiados
Fuente: Elaboración propia a partir de los datos recogidos

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

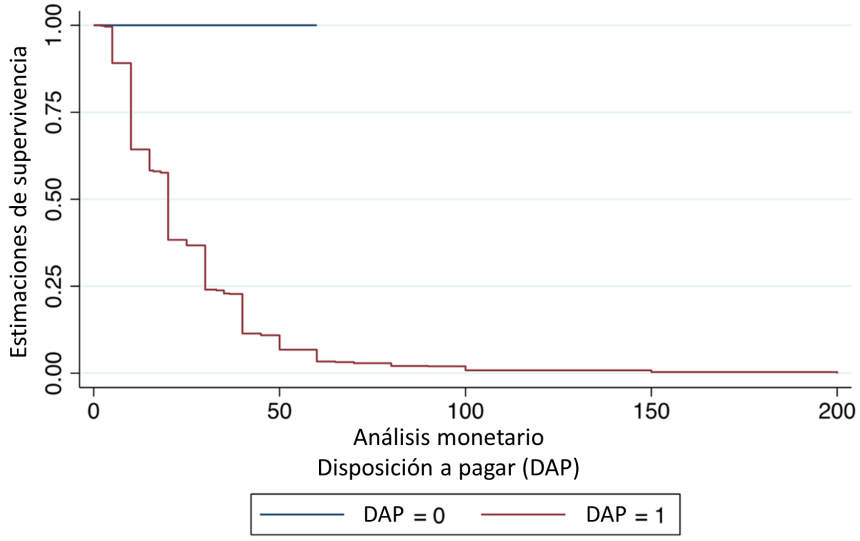

Figura 6. Estimaciones de supervivencia de la DAP
Fuente: Elaboración propia a partir de los datos recogidos

4 Discusiones

Los resultados de la investigación son útiles para que las autoridades regionales establezcan planes y programas de GIRSU capaces de satisfacer las demandas regionales de gestión de residuos (Gidarakos, Havas y Ntzamilis, 2006). Sin embargo, faltan estudios sobre cómo las poblaciones rurales gestionan sus residuos sólidos (Taboada-González y col., 2013). Los hallazgos de los estudios existentes indican que la recolección de residuos por parte de los gobiernos locales es deficiente, ya que una parte importante de esta población carece del servicio (Del Carmen-Niño y col., 2019). También existen sistemas informales de recolección de basura en zonas rurales, por los cuales los residentes deben pagar una cuota (Aljaradin, Persson y Sood, 2015).

Además, los resultados del presente estudio revelan que las poblaciones rurales utilizan los residuos orgánicos para alimentar a sus animales o en la producción de la composta (Del Carmen-Niño y col., 2019; Juárez López, 2009); esta tendencia muestra potencial para la aplicación del componente de reutilización de RSU. Además, algunos hogares utilizan la quema de basura como una práctica cultural o porque no hay recolección disponible de basura (Del Carmen-Niño y col., 2019; Friesen-Pankratz y col., 2011), la cual es una de las prácticas que la GIRSU trata de evitar ya que la quema de residuos es una vía para la contaminación del aire. Se observa un alto porcentaje de envoltorios de alimentos (92,48 %), como se ha mencionado en otros estudios en diferentes países, esta práctica está relacionada con el cambio en los patrones de consumo (Gidarakos, Havas y Ntzamilis, 2006).

Estudios anteriores revelan que la DAP está relacionada con el valor que los habitantes asignan a la calidad del medio ambiente en su comunidad, y con otros elementos socioeconómicos como el ingreso, el género, la edad, el nivel de educación, el tamaño de la familia, la descendencia, la ética ambiental y la confianza en el gobierno (Ibarrarán, Islas y Mayett, 2003; Quispe Mamani y col., 2020). En este caso, los factores relacionados son no hablar maya, mayor número de bienes y más habitaciones en la casa.

No obstante, hay un 69,75% de los hogares entrevistados dispuestos a pagar, lo que representa una oportunidad para que el gobierno establezca planes y programas adecuados de Gestión de Residuos Sólidos Urbanos en colaboración con una entidad privada. Este porcentaje es inferior al reportado por Song, Wang y Li (2016), que obtuvieron un 85,5% de respuestas positivas hacia la DAP en un estudio realizado en Macao, China.

Se pudo establecer la disposición a una paga

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

aproximada en la zona de estudio de 17,65 pesos mexicanos (0,85 dólares estadounidenses) por hogar, resultados significativamente inferiores a los obtenidos por Ferreira y Marques (2015) en Portugal (2,59 euros) o por Koford y col. (2012) en Estados Unidos (2,29 dólares), así como los 10,16 soles estimados por Colquehuanca Vilca y col. (2020) en Perú, los 4,79 dólares obtenidos por Song, Wang y Li (2016) en China, y Kayamo (2022) en Etiopía con 0,62 dólares por persona. La variación podría estar vinculada a los diferentes ingresos entre países, un elemento que excede el alcance de este estudio.

Tabla 5. Resultados del modelo de regresión Tobit

Variable	Coeficiente	Error estándar	z	P>|z|
Jefe de familia				
Sexo (1=hombre)	1,99	1,76	1,13	0,259
Edad	0,05	0,06	0,96	0,337
Habla maya (1=sí)	-3,74	2,00	**-1,87**	0,022
Años de escolaridad	0,43	0,25	**1,68**	0,093
Aspectos del hogar				
Tamaño de la familia	0,92	0,57	1,61	0,106
Número de habitaciones	4,05	0,81	**5,00**	0,000
Tiene teléfono móvil (1=sí)	10,95	2,95	**3,70**	0,000
Tiene una bicicleta (1=sí)	-7,52	1,86	**-4,04**	0,000
Tiene auto (1=sí)	8,00	2,46	**3,25**	0,001
Constante	-12,19	5,81	2,10	0,036

n=1.144; no censurado=800, censurado a la izquierda=341, censurado a la derecha=3; Chi^2=100,09 prob>Chi^2=0,000
Fuente: Elaboración propia a partir de los datos recogidos

5 Conclusiones

El método de valor contingente aplicado a la implementación de un sistema de recolección de residuos sólidos en comunidades semiurbanas de Yucatán se aplicó con éxito en este estudio. Su eficacia como método de evaluación directa del cambio de una situación que involucra a los residuos sólidos municipales se pone a prueba en las ciudades rurales y periurbanas de Yucatán, México.

La metodología utilizada permite establecer soluciones basadas en el mercado que concilien la capacidad de pago de los actores involucrados; sin embargo, al estar directamente asociados con el servicio público (recolección de residuos sólidos), es necesario desarrollar políticas públicas complementarias que atiendan la correcta disposición de

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

los residuos, así como su reducción. Los resultados de este estudio contribuyen a comprender mejor la relación entre los habitantes de las ciudades en crecimiento y poder abordar estos problemas que tienen consecuencias económicas, sociales y ambientales.

Los factores socioeconómicos que inciden en la disposición a pagar y que resultaron estadísticamente significativos permiten aproximarse al perfil generador de residuos sólidos urbanos. Esta información puede ayudar a futuros estudios a que permitan establecer un precio óptimo para el sistema de recogida de residuos sólidos urbanos, considerando además los siguientes elementos que se describen a continuación para garantizar la financiación y sostenibilidad económica del sistema. Si bien existen elementos culturales y sociales arraigados en la recolección de residuos sólidos, este sistema integrado puede ir acompañado de otro tipo de incentivos económicos para modificar el comportamiento de los consumidores hacia algo más beneficioso para el medio ambiente, como la renta de los hogares. Un ejemplo de ello podría ser el pago de la eliminación de los residuos con alto valor de reciclaje. En otros países, una adecuada asociación público-privada para la gestión de los residuos sólidos urbanos puede ser una estrategia eficaz para resolver los problemas de gestión de los RSU Aliu, Adeyemi y Adebayo (2014), Bhuiyan (2010) y Rode (2011).

Agradecimientos

En primer lugar, los autores agradecen a las familias que amablemente y, a pesar de las condiciones adversas derivadas de la COVID-19, respondieron a todas nuestras preguntas. A todo el equipo de campo dirigido por Andrea Herrera y Aida Moguel, a todos los encuestadores: Alejandrina Rodríguez, Jennefe Torres, Laura Pat, Nilma Loría, Pablo Tostado, William Chay y Alejandra Pinto. Por último, a la Universidad Marista de Mérida, por la financiación del proyecto.

Conflictos de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de interés.

Contribución de los autores

Conceptualización, FIHC; análisis formal, FIHC; investigación, FIHC y DECL; metodología, FIHC; supervisión, validación y visualización, FIHC, DECL, JBG y MPMG; escritura-borrador original, FIHC, DECL, JBG y MPMG; adquisición de financiación, MPMG; escritura-revisión y edición, FIHC, DECL y MPMG.

Referencias

Aliu, I., O. Adeyemi y A. Adebayo (2014). «Municipal household solid waste collection strategies in an African megacity: Analysis of public private partnership performance in Lagos». En: *Waste Management Research* 32, 67-78. Online:https://n9.cl/evm2r.

Aljaradin, M., K. Persson y E. Sood (2015). «The role of informal sector in waste management, a case study; Tafila-Jordan». En: *Resources and Environment* 5.1, 9-14. Online:https://n9.cl/v7zfm.

Bhuiyan, S.H. (2010). «A crisis in governance: Urban solid waste management in Bangladesh». En: *Habitat International* 34.1, 125–133. Online:https://bit.ly/3si9G01.

Canul Bacab, F. y P. May Hoil (2016). «El problema de la basura en el interior del estado de Yucatán.(Versión imprimible). Online:https://n9.cl/1y3g7y». En: *Reaxión* 3.2.

Carson, R. y M. Hanemann (2006). «Handbook of Environmental Economics». En: Elsevier. Cap. Contingent Valuation, págs. 821-936.

Colquehuanca Vilca, J. y col. (2020). «Disposición a pagar por eliminación de residuos urbanos (Municipalidad Provincial de Tambopata, Madre de Dios, Perú)». En: *Revista de Investigaciones Altoandinas* 22.4, 329-337. Online:https://n9.cl/g485h.

Couto Benítez, I., A. Hernández y C. Sarabia (2012). «La gestión integral de los residuos sólidos urbanos en Juárez: lecciones innovadoras para otros municipios». En: *Revista Pueblos y Fronteras Digital* 7.13, 178-209. Online:https://bit.ly/3MCcBHZ.

Del Carmen-Niño, V. y col. (2019). «La importancia de la participación y corresponsabilidad en el manejo de los residuos sólidos urbanos. Online:https://n9.cl/leysl». En: *Acta universitaria* 29.

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Del Saz-Salazar, S., M. Feo-Valero y B. Vázquez-Paja (2020). «Valuing public acceptance of alternative-fuel buses using a Latent Class Tobit model: A case study in Valencia». En: *Journal of Cleaner Production* 261, 121199. Online:https://n9.cl/vja2l6.

Diario Oficial de la Federación (2003). «Ley General para la prevención y gestión integral de los residuos». Online:https://n9.cl/z91u0.

El-Messery, M., G. Ismail y A. Arafa (2009). «Evaluation of municipal solid waste management in Egyptian rural areas». En: *J Egypt Public Health Assoc* 84.1-2, 51-71. Online:https://n9.cl/qb38z.

Ferreira, S. andra y R. Marques (2015). «Contingent valuation method applied to waste management». En: *Resources, Conservation and Recycling* 99, 111-117. Online:https://n9.cl/2k1nw.

Friesen-Pankratz, B. y col. (2011). «El Manejo de los residuos en una comunidad rural de México: Prácticas actuales y planes futuros». En: *Hacia la sustentabilidad: los residuos sólidos como fuente de energía y materia prima*, 451-455. Online:https://n9.cl/z0z16.

Gidarakos, E., G. Havas y P. Ntzamilis (2006). «Municipal solid waste composition determination supporting the integrated solid waste management system in the island of Crete». En: *Waste management* 26.6, 668-679. Online:https://n9.cl/xhtytf.

Greene, W. (2018). *Econometric Analysis*. Pearson.

Hoyos, D. y P. Mariel (2010). «Contingent valuation: Past, present and future». En: *Prague economic papers* 4.2010, 329-343. Online:https://n9.cl/8bva6.

Huamaní Montesinos, C. (2017). «Análisis socioeconómico y ambiental del reaprovechamiento y disposición final de los residuos sólidos en la ciudad de Juliaca, San Román, Puno-2017». Tesis de mtría. Universidad Nacional Del Altiplano.

Hui, Y. y col. (2006). «Urban solid waste management in Chongqing: Challenges and opportunities». En: *Waste management* 26.9, 1052-1062. Online:https://n9.cl/zwnl2.

INAFED (2021). *Sistema Nacional de Información Municipal. Secretaría de Gobernación*. Inf. téc. Secretaría de Gobernación.

INEGI (2015). *Biblioteca digital de mapas*.

Ibarrarán, M., I. Islas y E. Mayett (2003). «Valoración económica del impacto ambiental del manejo de residuos sólidos municipales: estudio de caso». En: *Gaceta ecológica* 67, 69-82. Online:https://n9.cl/cwipp.

Juárez López, A. (2009). «Manejo de residuos sólidos urbanos para los cauces fluviales de la zona urbana y suburbana de Acapulco, Guerrero. Chilpancingo». Tesis doct. Universidad Autónoma de Guerrero.

Kayamo, S. (2022). «Willingness to pay for solid waste management improvement in Hawassa city, Ethiopia». En: *Journal of Environmental Management* 302, 113973. Online:https://n9.cl/8p6m2.

Kaza, S. y col. (2018). *What a waste 2.0: a global snapshot of solid waste management to 2050*. World Bank Publications.

Koford, B. y col. (2012). «Estimating consumer willingness to supply and willingness to pay for curbside recycling». En: *Land Economics* 88.4, 745-763. Online:https://n9.cl/zjcid.

Maddala, G. (1983). *Limited-dependent and qualitative variables in econometrics*. Cambridge university press.

Marín García, A. y J. Quintanilla Jerezano (2007). «Diagnóstico del manejo de residuos sólidos urbanos en el Municipio de Acatlán, Veracruz. Xalapa.» Tesis doct. Universidad Veracruzana.

Quispe Mamani, J. y col. (2020). «Estimación de la disposición a pagar por un sistema de recolección mejorado de residuos sólidos domésticos en la ciudad de Juliaca-2020». En: *Ciencia y Desarrollo* 26, 77-87. Online:https://n9.cl/crfunm.

Rode, S. (2011). «Public private partnership in solid waste management in municipal corporations of Mumbai metropolitan region». En: *Management Research and Practice* 3, 23-38. Online:https://n9.cl/nhf9z.

Seadon, J. (2006). «Integrated waste management-Looking beyond the solid waste horizon». En: *Waste management* 26.12, 1327-1336. Online:https://n9.cl/vblpi.

Secretaría de Desarrollo Sustentable (2021). *Yucatán, primer estado del país en realizar un Programa de Manejo de Residuos específico para cada uno de sus 106 municipios*.

Secretaría de Desarrollo Social (2013). *Generación de Residuos Sólidos Urbanos*. Inf. téc. Dirección General de Equipamiento e Infraestructura en Zonas Urbano-marginadas.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2017). *Residuos Sólidos Urbanos y de Manejo Especial*.

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Silva, L. da, P. Prietto y E. Korf (2019). «Sustainability indicators for urban solid waste management in large and medium-sized worldwide cities». En: *Journal of Cleaner Production* 237, 117802. Online:https://n9.cl/3iooz.

Song, Q., Z. Wang y J. Li (2016). «Residents' attitudes and willingness to pay for solid waste management in Macau». En: *Procedia environmental sciences* 31, 635-643. Online:https://n9.cl/r3fz3.

Srivastava, V. y col. (2015). «Urban solid waste management in the developing world with emphasis on India: challenges and opportunities». En: *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology* 14, 317-337. Online:https://n9.cl/kufp0.

Taboada-González, P. y col. (2013). «Manejo y potencial de recuperación de residuos sólidos en una comunidad rural de México». En: *Revista Internacional de contaminación ambiental* 29, 43-48. Online:https://n9.cl/adg08.

Tchobanoglous, G. y F. Kreith (2002). *Handbook of solid waste management*. McGraw-Hill.

Tietenberg, T. y L. Lewis (2018). «Environmental and Natural Resource Economics». En: Routledge, New York. Cap. Environmental and Natural Resource Economics, 73–83.

Tobin, J. (1958). «Estimation of relationships for limited dependent variables». En: *Econometrica: journal of the Econometric Society* 26, 24-36. Online:https://n9.cl/q6kay.

Toker, S. y col. (2021). «Tobit Liu estimation of censored regression model: an application to Mroz data and a Monte Carlo simulation study». En: *Journal of Statistical Computation and Simulation* 91.6, 1061-1091. Online:https://bit.ly/49yEj1W.

Vij, D. (2012). «Urbanization and solid waste management in India: present practices and future challenges». En: *Procedia-Social and Behavioral Sciences* 37, 437-447. Online:https://n9.cl/p48af.

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

La granjA:
Revista de
Ciencias de la Vida
pISSN:1390-3799; eISSN:1390-8596
http://doi.org/10.17163/lgr.n39.2024.03

Número Especial/ Special Issue

Desarrollo Sostenible

Actitudes y prácticas ambientales de la población urbana de Puno, Altiplano Andino

Characterization of the environmental attitudes and practices of the urban population of Puno, Andean Plateau

Jesús Evaristo Tumi Quispe

Facultad de Ciencias Sociales, Universidad Nacional del Altiplano Puno. Av Sesquicentenario N° 1150. Departamento de Puno, Perú.

*Autor para correspondencia: jtumi@unap.edu.pe

Manuscrito recibido el 29 de enero de 2020. Aceptado, tras revisión, el 20 de febrero de 2020. Publicado el 1 de marzo de 2024.

Resumen

Durante las últimas décadas en Puno, Perú, la problemática de la contaminación se fue agudizando por la acción combinada del crecimiento desordenado de la población urbana, gestión deficiente de residuos sólidos, descarga de aguas servidas sin tratamiento en la bahía del lago Titicaca y prácticas de sanidad e higiene inadecuadas; situaciones que afectan severamente el ambiente y la salud humana. El objetivo del estudio fue caracterizar las actitudes y comportamientos proambientales de la población de la ciudad de Puno en relación al saneamiento, la contaminación y la gestión ambiental. La investigación es no experimental, cuantitativa, trans¬versal, descriptiva, correlacional y nivel de análisis micro. El universo de estudio fue la población mayor de 18 años del área urbana, que comprende 97.264 habitantes; la muestra, deter¬minada al azar simple, fue de 382 personas. Se aplicó un cuestionario estructurado. El análisis descriptivo, inferencial y prueba de hipótesis se realizó con el software estadístico SPSS. Los resultados señalan que las actitudes ambientales de la mayoría de la población son positivas respecto a factores y fuentes de contaminación y efectos en la salud humana; contrariamente, las prácticas ambientales son inadecuadas en gestión ambiental en el hogar y condiciones de sanidad e higiene en la vivienda. Se concluye, que la mejora sostenible de actitudes y comportamientos proambientales, demanda de una nueva política pública de educación ambiental, cuya implementación incorpore la participación efectiva de la sociedad civil con base a un sistema de incentivos.

Palabras clave: Ambiente, comportamiento, contaminación, preocupación, saneamiento.

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Abstract

During the last decades in Puno, Peru, the problem of contamination has worsened due to the combined action of the disorderly growth of the urban population, poor management of solid waste, discharge of untreated sewage into the bay of Lake Titicaca and practices of inadequate sanitation and hygiene, severely affecting the environment and human health. The objective of the study was to characterize the pro-environmental attitudes and behaviors of the city's population of Puno in relation to sanitation, pollution and environmental management. The research is non-experimental, quantitative, cross-sectional, descriptive, correlational and micro level of analysis. The universe of study was the population over 18 years of age in the urban area, which comprises 97,264 inhabitants; the sample, determined at simple random, was 382 people. A structured questionnaire was applied. Descriptive and inferential analysis and hypothesis testing were performed with SPSS statistical software. The results indicate that the environmental attitudes of the majority of the population are positive regarding factors and sources of pollution and effects on human health. On the contrary, environmental practices are inadequate in environmental management in the home and health and hygiene conditions in the home. It is concluded that the sustainable improvement of pro-environmental attitudes and behaviors demands a new public policy of environmental education, whose implementation incorporates the effective participation of civil society based on an incentive system.

Keywords: Environment, behavior, concern, contamination, sanitation.

Forma sugerida de citar: Tumi Quispe, J.E. (2024). Actitudes y prácticas ambientales de la población urbana de Puno, Altiplano Andino. La Granja: Revista de Ciencias de la Vida. Vol. 39(1):43-62. http://doi.org/10.17163/lgr.n39.2024.03.

IDs Orcid:

Jesús Evaristo Tumi Quispe: http://orcid.org/0000-0001-9719-0821

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

1 Introducción

La preocupación por los problemas del medio ambiente comienza a expresarse de manera más abierta en los años setenta del siglo pasado (Vargas, Martínez y Fernández, 2019); en los ochenta se incorpora la preocupación por el medio ambiente en el comportamiento humano (Álvarez y Vega, 2009) y hasta inicios de los noventa recién se hace referencia expresa en el contexto global en la Cumbre de la Tierra de Río de Janeiro (Agenda 21, 1992).

Desde la perspectiva de las Ciencias Sociales, la promoción de la investigación en torno a tal preocupación se viene expresando en formulaciones teóricas, propuestas metodológicas y tratamientos empíricos que permiten visualizar el entendimiento de los seres humanos para interpretar la problemática (Amérigo, Aragonés y García, 2012); situación que se expresa en las preocupaciones ambientales y su correlato en los comportamientos proambientales.

Ante esta problemática, existe un vasta y fecunda producción científica sobre la temática realizada desde diferentes perspectivas. En efecto, de un lado existen estudios con enfoques unidimensionales pro/anti-ambientalismo en la relación del *self* y la naturaleza, con énfasis en seguridad, salud y medio ambiente (Vargas, Martínez y Fernández, 2019) o educación ambiental por género (Pérez-Franco, Pro-Bueno y Pérez-Manzano, 2018). Por otro lado, existen estudios con estructuras bidimensionales con marcado énfasis en procesos cognitivos, como: antropocentrismo-ecocentrismo (Thompson y Barton, 1994), nuevo paradigma ecológico (Dunlap y col., 2000) y utilización-preservación (Milfont y Duckitt, 2010) o enfoques con marcado énfasis en los procesos afectivos y emocionales, como: afinidad emocional (Kals, Schumacher y Montada, 1999), identidad (Clayton, 2003) y articulación con la naturaleza (Vining, Merrick y Price, 2008), cuyos marcos metodológicos fueron tomados para realizar estudios empíricos (Suárez y col., 2007).

Así como estudios no sólo con estructuras factoriales tripartitas: egoísmo, socioaltruismo y biosferismo (Amérigo y col., 2005); Antropocentrismo, progreso y naturalismo (Hernández y col., 2001), sino también estudios bajo estructuras teóricamente integradas de cuatro dimensiones: apatía, antropocentrismo, conectividad y afinidad emocional (Amérigo, Aragonés y García, 2012).

No obstante, son escasos o poco difundidos los estudios sobre el comportamiento ambiental; más aún, son casi inexistentes los referidos a la relación entre las actitudes con medidas de la conducta o comportamiento ambiental, siendo pioneros, en esta línea las propuestas conceptuales en torno a educación en la materia realizados por Álvarez y Vega (2009) y los estudios exploratorios de Amérigo, Aragonés y García (2012), Amérigo y García (2014), Amérigo, García y Cortes (2017), Favara y Moreno (2020), Rivera-Jacinto y Rodríguez-Ulloa (2009), Hernández y col. (2001) y Palavecinos y col. (2016). La mayoría de estas investigaciones empíricas han tomado como unidades de análisis, principalmente, a estudiantes universitarios de España, México, Brasil, Chile, Argentina, Perú, y complementariamente a personas mayores de edad en Costa Rica y España.

En este marco, en los países en vías de desarrollo como el Perú, la mayoría de enfermedades que aquejan a la población en situación de pobreza extrema y vulnerable en gran parte son atribuibles a necesidades básicas relacionadas con el saneamiento ambiental (Organización Mundial de la Salud, 2019) y la gestión de residuos sólidos dado el enorme volumen que se produce en las zonas urbanas y con las dificultades para eliminarlos, agudizado por las prácticas ambientales inadecuadas que en definitiva denotan un cuadro que despierta preocupación en diferentes sectores de la sociedad que tratan de alertar y sensibilizar a la población y autoridades. Las soluciones y respuestas al problema son muy diversas a nivel global, regional y nacional, dependiendo de las características económicas, geográficas, políticas, educativas y culturales (Velásquez Patiño, 2008).

En Puno, la situación se torna aún más crítica, dado que las aguas servidas y excretadas son vertidas a la bahía del lago Titicaca sin un tratamiento adecuado, aunado a la deficiente gestión de los residuos sólidos urbanos, el colapso del sistema de lagunas de oxidación, los desmontes ocasionados por el sistema de construcción urbana, la fragilidad y divorcio de los factores tecnológicos, institucionales y sociales, que afectan severamente el medio ambiente y la salud humana (Tumi Quispe, 2014).

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Frente a esta problemática, compleja y de múltiples determinaciones, el estudio tiene como eje organizador dar respuesta a la siguiente preocupación fundamental: ¿cuáles son las expresiones y relación de las actitudes y prácticas proambientales de la población de la ciudad de Puno sobre saneamiento, contaminación y gestión ambiental? La finalidad de la investigación es contribuir al diseño de una política pública de educación ambiental que sirva de marco orientador del comportamiento ciudadano y la gestión institucional relacionado con el medio ambiente.

2 Materiales y Métodos

2.1 Área de estudio

El contexto de estudio es la ciudad de Puno, que está comprendida desde la orilla oeste del lago Titicaca, en la bahía interior antes llamada Paucarcolla, sobre una superficie ligeramente ondulada, rodeada por cerros. El lago Titicaca, localizado en la zona altiplánica entre Perú y Bolivia, a una altitud de 3,810 msnm, con un área total de 8 167 km^2, amplitud máxima de 125 kms. y una extensión de 400 kms., es considerado como el lago navegable más alto del mundo, y su importancia está sustentada en la riqueza de su biodiversidad, fauna acuática y potencial turístico (Aranibar Ramos y Patiño Huayhua, 2022; Tumi Quispe, 2016); pero paradójicamente, su bahía interior viene siendo objeto de un creciente proceso de contaminación (Luca y Ticona, 2006) y eutrofización severa (Jimenez, Jahuira e Ibañez, 2016; Fontúrbel-Rada, 2003) producto de la acción antrópica (Valderrama y Canales, 2007), con efectos negativos sobre la salud humana (Miranda Aliaga, 2004; Valderrama y Canales, 2007) y el ambiente.

2.2 Diseño de investigación

El diseño de investigación es no experimental (dado que el estudio no establece la manipulación de las variables independientes, sino que asume el respeto irrestricto del ambiente natural y social) y transversal (el proceso de recolección de información y medición de variables se realizó estableciendo un solo corte temporal). El enfoque de la investigación es cuantitativo; por su dimensión de análisis es socioambiental; por su profundidad es descriptivo y correlacional; el nivel de análisis es micro.

2.3 Población, Tipo de muestreo y muestra

El universo estuvo conformado por la población mayor de 18 años que reside en el área urbana de Puno, que comprende 97 264 habitantes (Instituto Nacional de Estadística e Informática, 2018); la población operacional, determinado al azar simple sin reemplazo y considerando el 95% grado de confianza y un margen de error de 0,05, es de 382 personas.

2.4 Técnica e instrumento de recolección de datos

La técnica de recolección de datos fue la encuesta, mediante un cuestionario estructurado aplicado a jefes de familia entre octubre-diciembre del 2018. Las actitudes ambientales fueron medidas con 12 ítems agrupados en tres dimensiones: factores de contaminación en la vivienda (calidad del agua, recogido de basura, calles sin pavimentar, animales domésticos en la vivienda y obstrucción del alcantarillado), fuentes de contaminación de la bahía del lago Titicaca (aguas residuales, residuos sólidos, colapso de la laguna de oxidación), efectos de los factores y fuentes de contaminación en la salud humana (síntomas neuro psíquicos, digestivas, dermatológicas y oculares).

La medición de las conductas ambientales se realizó mediante 14 ítems agrupados en tres tipos de comportamientos: prácticas ambientales en el hogar (tipo de recipiente para almacenar residuos sólidos (RS), lugar de almacenaje de RS en la vivienda, periodicidad de evacuación y disposición final), condiciones de acceso a servicios de agua en la vivienda (fuentes de provisión de agua en la vivienda, acceso y distribución domiciliaria de agua, servicios higiénicos instalado y operativo) y prácticas de sanidad e higiene en el hogar (frecuencia de lavado de manos después de manipular RS, lugar de evacuación de heces, frecuencia de limpieza del baño). La valoración de las dimensiones de actitudes y prácticas ambientales, se realizó bajo el sistema vigesimal (0 a 20 puntos), considerando en cada ítem diferentes categorías en concordancia a la normatividad vigente sobre saneamiento ambiental.

Complementariamente, el estudio hizo uso de fuentes secundarias, referida a información sobre el censo de población y vivienda (Instituto Nacional

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

de Estadística e Informática, 2018), así como diagnósticos y estudios de evaluación sobre contaminación y eutrofización de la cuenca del lago Titicaca realizada por la institucionalidad ambiental regional.

2.5 Procesamiento y análisis estadístico

El procesamiento de la data se realizó con el software estadístico SPSS, así como el análisis descriptivo, inferencial y prueba de hipótesis. La prueba estadística realizada fue no paramétrica a través de la distribución de probabilidad del chi-cuadrado para establecer el grado de correlación existente entre las actitudes ambientales (óptica dimensional) y el comportamiento ambiental (óptica tridimensional) que posee la población de Puno, indicando que más de la mitad de la población posee actitudes positivas (62%); contrariamente, las prácticas ambientales son inadecuadas en la mayoría de la población (55,2%). Los criterios para el uso de la prueba estadística del Chi cuadrado (Ritchey, 2002; Flores, Miranda y Villasís, 2017), responden a que las variables centrales del estudio dada su naturaleza nominal u ordinal no posibilitaron realizar pruebas estadísticas con mayor nivel de precisión y profundidad.

3 Resultados

La población urbana de Puno, presenta los siguientes rasgos básicos: En cuanto a la ocupación principal, la mitad de la población (50,79%) está constituida por trabajadores independientes y uno de cada cuatro es empleado; en cuatro de cada cinco jefes de familias sus ingresos son menores de 2000 mil soles; en tanto que en 1 de cada 10 sus ingresos son menores al ingreso mínimo vital (US $ 232), merced a lo cual, dichas familias se encuentran dentro del cinturón de la pobreza o extrema pobreza. En relación al grado de instrucción de los jefes de familia, son mayoría los que poseen instrucción superior (64,92%) y en menor proporción nivel secundaria (29,84%). La mayor parte (69,90%) son propietarios de las viviendas, y una proporción menor está en condición de alquilados (28,80%); lo cual pudiera suponer una mayor identidad vecinal y sentido de pertenencia a la zona que habitan que podría condicionar sus actitudes y prácticas ambientales respecto a la contaminación de la bahía del lago Titicaca.

En este contexto, la valoración de las actitudes y prácticas ambientales de la población de Puno tiene como marco de referencia general la realidad concreta, condicionada tanto por el contexto económico, social y cultural, así como por el nivel y grado de eficacia de la institucionalidad regional ambiental para promover un programa de educación ambiental que contribuya a la construcción de una consciencia ambiental y ecológica de los actores sociales en perspectiva sostenible (Figura 1).

A nivel de estructura, el modelo conceptual propuesto establece como componentes fundamentales los conocimientos conceptuales ambientales (CCA) y la conciencia ambiental ecológica (CAE). A nivel de función, el modelo considera un proceso de articulación (relación, entrelazamiento, coexistencia y dependencia), que podrá ser de concordancia y/o discordancia de los conocimientos conceptuales ambientales que tendrá su correlato y expresión en las actitudes proambientales (APA), y la conciencia ambiental y ecológica que se expresa en las prácticas proambientales (PPA) de los actores sociales e institucionales.

En este marco, la tipificación de las actitudes (positivas o negativas) y prácticas ambientales (adecuadas o inadecuadas) que posee la población urbana de Puno se realiza considerando los siguientes ejes y dimensiones de análisis. En la valoración de las actitudes ambientales se consideran las expresiones sobre los factores de contaminación en la vivienda, las fuentes de contaminación de la bahía del lago Titicaca y los efectos de la contaminación de la bahía del lago Titicaca en la salud humana. La valoración de las prácticas ambientales está relacionada con la gestión ambiental en el hogar, el acceso a los servicios de agua en la vivienda y las condiciones de sanidad e higiene de la familia en el hogar. La valoración de las relaciones de actitudes y prácticas proambientales se establece a través de la prueba estadística no paramétrica de chí cuadrado.

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

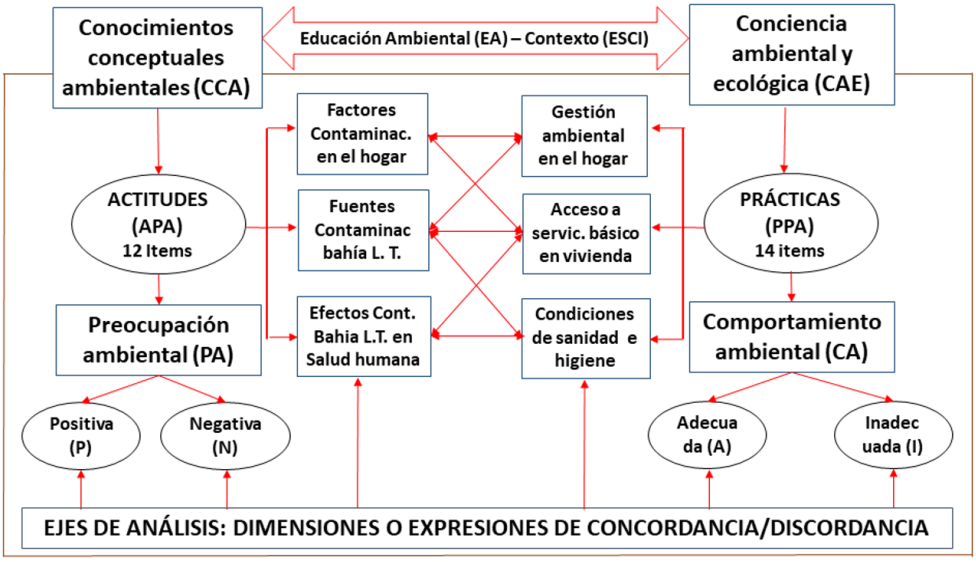

Figura 1. Modelo de relaciones entre actitudes y prácticas proambientales
Fuente: Elaboración propia (2020)

3.1 Actitudes ambientales de la población urbana de Puno

Las actitudes ambientales de la población, en términos generales, denota que la mayoría de los jefes de familia poseen actitudes positivas según dimensiones (factores de contaminación en la vivienda, fuentes de contaminación de la bahía del lago Titicaca y efectos en la salud humana) y categorías de análisis (Figura 2):

- Las actitudes positivas de la población ante los factores de contaminación en la vivienda denotan la priorización de la calidad del agua (93,2%) y recogido de basura (88,5%); siendo menor en las otras categorías de análisis.
- Las actitudes respecto a las fuentes de contaminación de la bahía son diferenciadas, en tanto enfatizan el efecto negativo que tiene el colapso de las lagunas de oxidación (84,3%) y las aguas residuales (77,5%), lo que pone en cuestión la gestión del gobierno municipal; en tanto que el efecto de la deficiente gestión de residuos sólidos es menor (56,8%), situación que implícitamente expresa el sentido de corresponsabilidad que tienen las familias y el gobierno municipal en la disposición final de residuos sólidos.
- Las actitudes respecto a efectos de la contaminación en la salud humana enfatizan el efecto negativo en la incidencia de los síntomas neuro psíquicas (69,9%) y digestivas (66,4%), siendo menor o inexistente la incidencia en los síntomas dermatológicas y oculares.

Por otro lado, las actitudes ambientales de la población de Puno, considerando las variables grado de instrucción y género de los jefes de familia, presentan diversas tendencias (Tabla 1):

- Sobre los factores de contaminación en la vivienda y considerando el grado de instrucción, denota actitudes positivas del nivel primario que prioriza la calidad del agua (100%) y recogido de basura (95%), siendo menor en la población del nivel secundario y superior. En la situación de género se presenta una tendencia similar en la priorización de los factores de contaminación, pero con mayor actitud positiva en las mujeres (94,7%) respecto a los varones (91%).
- En cuanto a fuentes de contaminación de la bahía del lago Titicaca, la mayor proporción de actitudes positivas se presenta en la población de nivel primario que enfatizan el efecto negativo del colapso de la laguna de oxidación (100%) y en menor medida las aguas residuales (85%); sobre estos mismos factores,

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

en la situación de género, los varones (86,5% y 82,4%) en mayor medida enfatizan el efecto negativo.

- Los efectos negativos en la salud humana de los factores y fuentes de contaminación de la bahía en la percepción de la población se enfatizan en los síntomas neuro psíquicos y digestivos, donde la actitud positiva es mayor en el nivel de instrucción superior (4 de 5 personas), y en los varones respecto a las mujeres.

En consecuencia, el estudio muestra que las actitudes de la mayoría de la población (62%) son positivas, pero diferenciadas, dado que en los factores de contaminación en la vivienda se enfatiza la calidad del agua (93,2%) y recogido de basura (88,5%); en las fuentes de contaminación de la bahía del lago Titicaca se enfatiza el efecto negativo del colapso de las lagunas de oxidación (84,3%) y aguas residuales (77,5%) y los efectos en la salud humana sobre todo en los síntomas neuro psíquicos (69,9%) y digestivos (66,4%). Por consiguiente, una mejora sustancial de la preocupación proambiental de la población está condicionada por el accionar preventivo del gobierno local y regional no sólo para mitigar los factores y fuentes de contaminación con tecnologías limpias, sino también para implementar mecanismos de participación, afianzando el sentido de corresponsabilidad en las organizaciones de la sociedad civil.

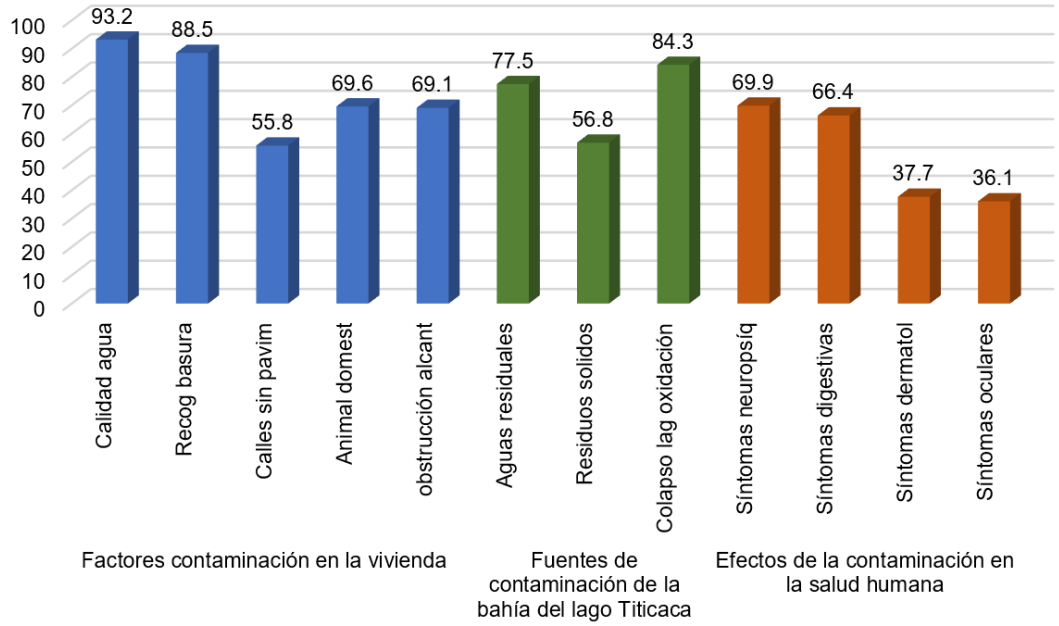

Figura 2. Actitud ambiental positiva de la población urbana de Puno por dimensiones y categorías de análisis

3.2 Prácticas ambientales de la población urbana de Puno

La caracterización del comportamiento ambiental de la población se realiza considerando las dimensiones de gestión ambiental de la familia en el hogar, el acceso a servicios de agua en la vivienda y condiciones de sanidad e higiene.

3.2.1 Gestión ambiental de la familia en el hogar

En líneas generales, las prácticas ambientales de la familia en el hogar están relacionadas con el tipo de recipiente para almacenar residuos sólidos (RS), lugar en la vivienda donde se depositan RS, periodicidad de evacuación de RS, disposición final de RS y frecuencia de lavado de manos después de manipular RS, en torno a los cuales presenta diversas tendencias (Figura 3):

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

- Los recipientes para el almacenamiento de RS que utilizan la mayoría de las familias en la vivienda denotan la predominancia del uso de bolsas de polietileno (66,5%) y en menor medida los recipientes impermeables con tapa (26,4%).
- El almacenamiento temporal de los residuos sólidos urbanos indica que es dominante la tendencia a almacenar en el patio de la vivienda (77,23%), siendo poco significativa la cocina (5,49%).
- En cuanto a la periodicidad de evacuación de residuos sólidos en la vivienda, la mayoría de las familias lo hacen en forma interdiaria (58,9%) y en menor medida diariamente (12.83%), mostrando una situación problemática de 1/3 de la población que evacua con periodicidad semanal.
- En cuanto a la disposición final de residuos sólidos, como proceso intermedio o almacenamiento temporal, denota que la mayoría de las familias (88,74%) lo realizan en el contenedor en forma directa o el depósito colectivo fuera de la vivienda, considerado dichas prácticas adecuadas. Similar tendencia se observa en la práctica de frecuencia de lavado de manos.

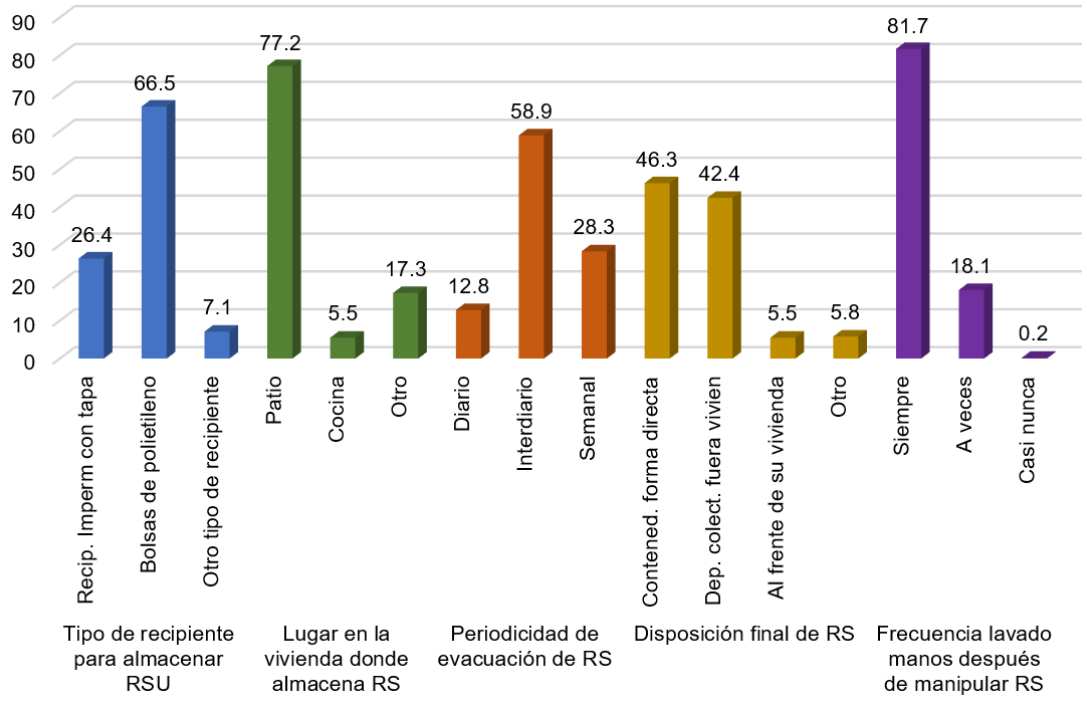

Figura 3. Práctica ambiental de la población sobre disposición de residuos sólidos por dimensiones y categorías de análisis

La práctica ambiental de la población sobre la disposición de residuos sólidos según el grado de instrucción y situación de género presenta las siguientes tendencias específicas (Tabla 2):

- La utilización de recipientes para almacenamiento de residuos sólidos según el grado de instrucción muestra que en forma predominante se utilizan las bolsas de polietileno, especialmente los de nivel primario (100%); en tanto que, según el género, la proporción es de 2/3 por la predominancia del uso de bolsas de polietileno entre varones y mujeres, práctica considerada como adecuada.
- Se presenta relativa homogeneidad en la población por grado de instrucción y género respecto al patio de la vivienda donde se almacenan los residuos sólidos, con lo cual evitan la

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

proliferación de vectores y el mal olor dentro de la vivienda.

- La periodicidad de la evacuación de residuos sólidos denota que alrededor de la mitad de las familias tanto de los diferentes niveles de instrucción como de género, la práctica es adecuada cuya periodicidad es interdiaria, temporalidad que está condicionada por la recurrencia de las unidades colectoras del gobierno municipal.
- La disposición final de residuos sólidos que realizan las familias principalmente en el depósito colectivo fuera de la vivienda y complementariamente en el contenedor en forma directa son prácticas adecuadas tanto en las familias de los diversos niveles de instrucción como por la situación de género.
- El lavado de manos después de manipular los residuos sólidos es adecuado, dado que más del 80% de jefes de familia lo realizan siempre, tanto los de nivel de instrucción secundaria y superior, siendo similar en la situación de género.

3.2.2 Acceso a servicios de agua segura en la vivienda

Las condiciones de acceso a servicios de agua segura que tiene la población urbana se advierten en la fuente de provisión de agua en la vivienda, nivel de acceso y distribución domiciliaria de agua, servicios higiénicos instalado y operativo (Figura 4):

- La fuente de provisión de agua en las viviendas de la población, en forma generalizada, es mediante una red pública (94,77%), en tanto que menos del 5% de viviendas, localizadas principalmente en los barrios urbanos marginales, se proveen de pozo o pileta pública.
- El 98% de la población tiene acceso y distribución domiciliaria de agua segura, del cual 65.97% tiene acceso por horas al día, en tanto que sólo un 1/3 de las viviendas cuentan con agua de forma permanente.
- La situación de los servicios higiénicos en el hogar en más del 97% de la población se encuentran instalados y operativos.

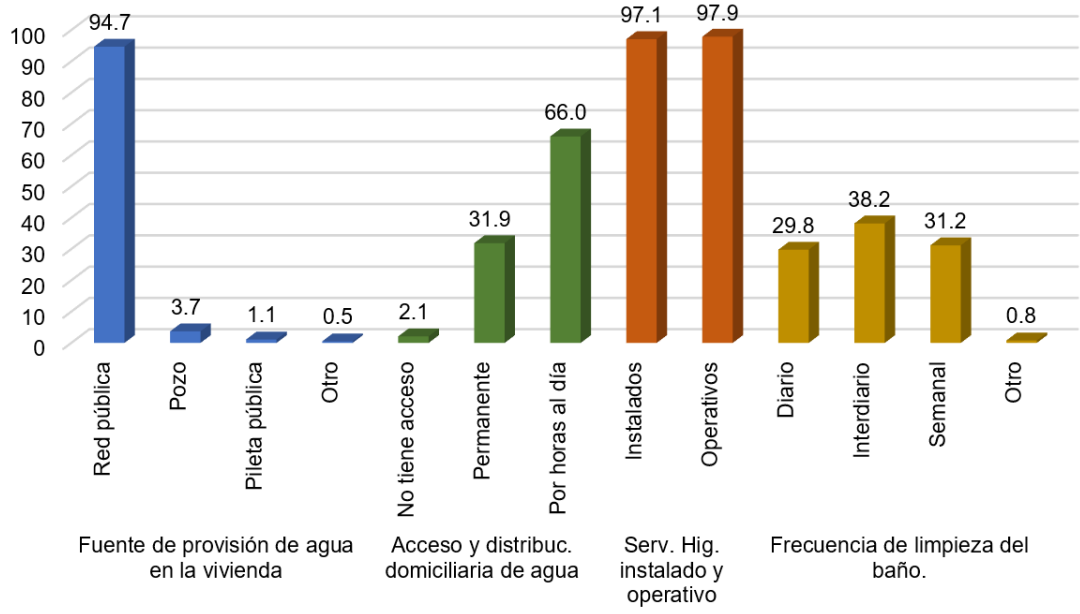

Figura 4. Condiciones de acceso a servicios de agua en la vivienda por dimensiones y categorías de análisis

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Las condiciones de acceso a servicios de agua segura que tiene la población urbana presentan diversas tendencias si se considera el grado de instrucción y situación de género (Tabla 3):

- La fuente de provisión de agua en las viviendas de la población denota que, aunque es predominante (más del 90%), el acceso mediante red pública es relativamente mayor en viviendas de jefes de familia de instrucción superior y en mujeres.
- La forma predominante de acceso y distribución domiciliaria de agua segura que tienen las familias tanto de nivel de instrucción y situación de género es en forma permanente u horas por día, situación que tendrá un efecto positivo sobre la salud e higiene de los miembros de la familia.
- Los servicios higiénicos de las familias en forma predominante (9 de cada 10) se encuentran instalados y operativos, siendo relativamente mayor en jefes de familia de grado de instrucción secundaria y superior y la condición de mujer; situación que incide en la preservación de la buena salud de los miembros de la familia.

En consecuencia, un aspecto importante del acceso a servicios básicos de la familia está en relación con la cobertura del servicio que brinda la Empresa de Saneamiento Ambiental de Puno.

3.2.3 Prácticas de sanidad e higiene de la población

Las condiciones de sanidad e higiene que poseen los miembros de la familia en el hogar están relacionadas con la forma de almacenamiento del agua en el domicilio; acciones para desinfectar el agua de beber en el hogar; tapado de recipiente donde se almacena el agua de beber en el hogar; lugar de evacuación de heces y frecuencia de limpieza de baño (Figura 5):

- La forma de almacenamiento del agua en las viviendas presenta un carácter variado y diversificado: por un lado, alrededor de la mitad de las familias depositan el agua de manera adecuada en un tanque de polietileno (44,2%) o en un tanque de cemento (5,0%); en tanto más de la mitad almacenan en recipientes inadecuados, tales como cubos de plástico (18,8%), baldes (24,6%) o cilindro (7,3%).
- En cuanto a la práctica de desinfección del agua de beber, la mayoría de las familias (81,7%) lo hace hirviéndola y sólo menos de 1/6 de familias la hierven, desinfectan y filtran.
- La práctica de la mayoría de familias urbanas (91,1%) es que el recipiente donde almacenan el agua de beber se mantenga tapado, en tanto que sólo nueve de cada cien familias no lo hacen.
- En este marco, es generalizada la práctica adecuada, principalmente en los servicios higiénicos del domicilio (96,6%).
- La frecuencia de limpieza del baño es adecuada en la mayoría de las familias (68.3%); aunque con mayor frecuencia se realiza de forma interdiaria (38.2%) y diaria (30.1%), que se considera una práctica ambiental ideal. La frecuencia de limpieza del baño denota que las familias lo realizan en forma proporcional entre diaria, interdiaria y semanal. Siendo esta última una práctica inadecuada, por los riesgos a la proliferación de focos infecciosos dentro de la vivienda.

Las prácticas de sanidad e higiene de la población urbana de Puno según grado de instrucción y género presenta las siguientes tendencias específicas (Tabla 4):

- La forma de almacenamiento de agua en el domicilio, según el grado de instrucción, denota que la mayoría de nivel superior (52%) y varones (48.2%) poseen prácticas adecuadas porque utilizan el tanque de polietileno como forma de almacenamiento de agua.
- La práctica sanitaria de hervir el agua para beber caracteriza a la mayoría de las familias de los diferentes niveles de instrucción, como también varones y mujeres.
- El lugar de evacuación de heces de jefes de familia tanto a nivel de grado de instrucción y de género más del 90% lo realizan en los baños del domicilio. Contrariamente, si bien es cierto que es mínima la proporción de quienes evacuan sus heces al aire libre (1,3%) o en la bahía del lago Titicaca (1.8%), esta constituye una práctica que atenta contra el medio ambiente y la salud humana.

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

- Referente a la frecuencia de limpieza del baño es aceptable en la mayoría de las familias de los diversos grados de instrucción y situación de género, pues se realizan en forma diaria o interdiaria; práctica ambiental que incide positivamente en la conservación de la salud e higiene de la familia.

En consecuencia, el estudio con base a la normatividad ambiental muestra que sólo el 44,8% de la población realiza prácticas ambientales adecuadas en cuanto a la disposición de residuos sólidos urbanos, el 64,1% en las condiciones de disponibilidad y acceso a servicios de agua y el 62,2% en las prácticas de sanidad e higiene en el hogar, denotando la precariedad de la conciencia ambiental de la población, cobertura limitada y precariedad de las acciones proambientales del gobierno local y regional. La mejora sostenida del comportamiento proambiental de la población demanda la implementación de una nueva política pública de educación ambiental bajo la corresponsabilidad de la institucionalidad regional ambiental, el sector educativo y la academia.

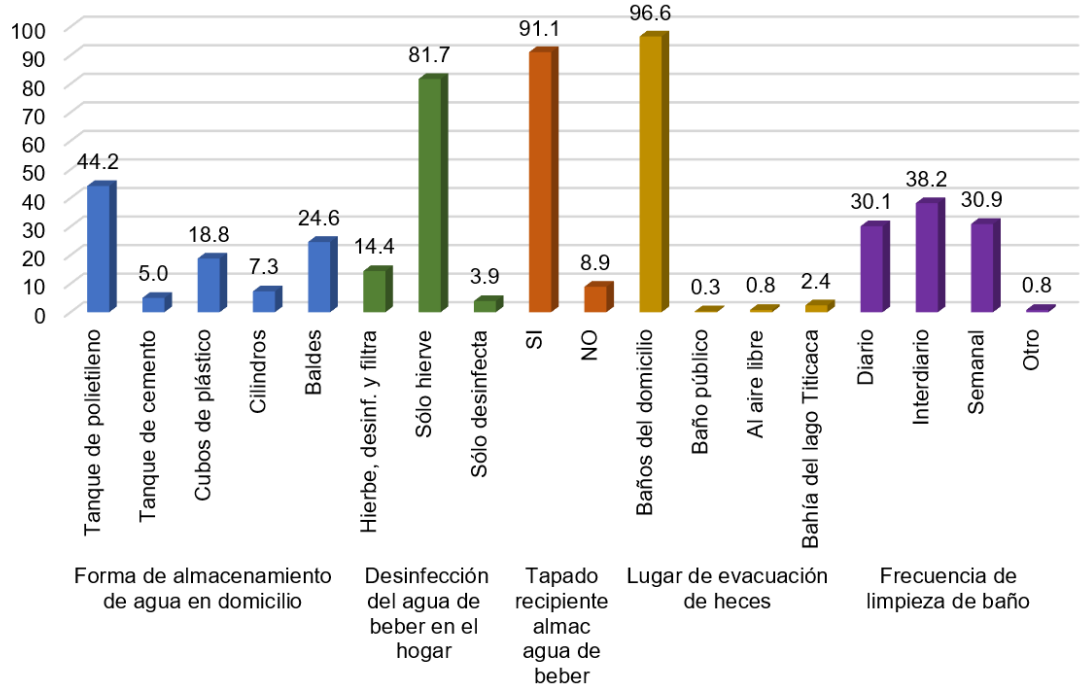

Figura 5. Prácticas de sanidad e higiene de la población urbana de Puno por dimensiones y categorías de análisis

3.3 Relación entre actitudes y prácticas ambientales de la población urbana de Puno

La relación entre las actitudes y prácticas ambientales de la población urbana de Puno sobre gestión ambiental de la familia en el hogar, acceso a servicios de agua y condiciones de sanidad e higiene en el hogar se establece en dos dimensiones:

- A nivel general, ante la existencia de un grado de significancia calculada de la prueba de chi-cuadrado que es igual a 0,000, cuyo valor al ser menor al nivel de significancia alfa es de 0,05 (5%). El estudio revela la evidencia estadística de la asociación y la dirección de una relación lineal entre ambas categorías analíticas, pero, proporcionalmente, muestra una relativa disparidad entre ellos, dado que la mayoría de la población (62%) posee una actitud positiva, contrariamente, la mayoría de la población (55,2%) tiene prácticas ambientales inadecuadas, presentando una diferencia de 18 puntos porcentuales entre ellos (Tabla 5).
- A nivel específico, estableciendo la relación

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

entre las actitudes con las variables de las dimensiones de las prácticas se tienen las siguientes referencias. En las variables de prácticas de la familia en el hogar y del acceso a servicios de agua en la vivienda, según la evidencia estadística (prueba del chi-cuadrado), el estudio demuestra que no existe nivel de correlación; en cambio, con la dimensión condiciones de sanidad e higiene de la familia en el hogar se presenta un nivel de correlación sólo con las variables forma de almacenamiento de agua en el domicilio y las acciones de desinfección del agua de beber. También se presenta el nivel de correlación entre las actitudes y prácticas proambientales si se consideran las variables de localización espacial de la vivienda en el entorno de la bahía del lago Titicaca, la ocupación y grado de instrucción, mas no con la variable situación de género.

En consecuencia, respecto a la relación entre actitudes y prácticas proambientales, el estudio muestra que las actitudes positivas de la mayoría de la población no se traducen necesariamente en comportamientos proambientales adecuados, situación que pone en tela de juicio la precariedad de la consciencia ambiental de la población y del accionar de la institucionalidad ambiental local y regional.

4 Discusión y Conclusiones

Los resultados del estudio, con base a la normatividad ambiental referida a la regulación de las acciones institucionales e individuales en la materia, criterios de valoración y evidencia estadística, permiten concluir que las actitudes ambientales de la mayoría de la población son positivas, especialmente en cuanto al reconocimiento de los factores de contaminación en la vivienda, fuentes de contaminación de la bahía del lago Titicaca y efectos negativos en la salud humana; contrariamente, las prácticas proambientales son inadecuadas, principalmente en cuanto a la gestión ambiental en el hogar y las prácticas de sanidad e higiene en la vivienda; merced a lo cual se denota la existencia de una relativa discordancia entre las actitudes proambientales y las dimensiones de las prácticas proambientales de la población urbana de Puno, situación que se encuentra condicionada por el grado de instrucción y relaciones de género que establecen las unidades de análisis.

4.1 Preocupaciones ambientales

El estudio, con base a la normatividad ambiental vigente, muestra que la mayoría de la población urbana (6 de cada 10 habitantes) presentan una valoración positiva sobre los factores de contaminación en la vivienda y fuentes de contaminación de la bahía del lago Titicaca y su correlato en efectos en la salud humana, denotando el sentido de corresponsabilidad de la población y el gobierno local. Estos resultados guardan relativa concordancia con lo señalado por Estrada y col. (2021) donde estudiantes de educación superior de Madre de Dios-Perú muestran una moderada preocupación ambiental asociado a variables sociodemográficas (género, edad y grado de instrucción); en México, Cantú (2020) muestra que pese a la similitud de opiniones entre los géneros, las mujeres presentan una mayor preocupación ambiental que los varones; en tanto que Pérez-Franco, Pro-Bueno y Pérez-Manzano (2018) encuentran una actitud moderadamente positiva hacia el medio ambiente en estudiantes de secundaria de Murcia, con diferencias de género; o la esperanza de mejora en el futuro como lo señala el proyecto ROSE (Vázquez y Manassero, 2008).

Contrariamente, Vargas, Martínez y Fernández (2019) catalogan de inaceptable el nivel de actitudes ambientales del 69% de estudiantes universitarios mexicanos, siendo más preocupante en áreas relacionadas con la seguridad, salud y medio ambiente; Andrade Salazar y Gonzales Portillo (2019) demuestran que la precariedad de conocimientos ambientales dificulta la conformación de una actitud y conciencia ambiental robusta; en tanto que Moreno, Rodriguez y Favara (2019) muestran que lo ambiental no es prioritario en la visión de los estudiantes universitarios del Gran Buenos Aires y Paraná, sino las urgencias socioeconómicas. Esta situación pone de manifiesto que las actitudes ambientales presentan una naturaleza compleja y contradictoria, merced a lo cual, los comportamientos favorables están disminuyendo progresivamente durante las últimas dos décadas en los 33 países europeos estudiados, sin encontrar una razón objetiva para tal declive (Franzen y Vogl, 2013).

Asimismo, se sostiene que el análisis de las relaciones ser humano-naturaleza en distintos contextos culturales no pueden abordarse desde una perspectiva unidimensional, como han supuesto las medidas tradicionales de las actitudes ambientales

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

y la preocupación por el medio ambiente (Amérigo, Aragonés y García, 2012), sino que se plantean evidencias de la necesidad de considerar enfoques multidimensionales, en cuyo marco podría articularse la escala de Thompson y Barton (1994) que mide la orientación de la conducta hacia el medio ambiente y la escala de Schultz (2001) que establece la valoración del impacto del medio ambiente sobre diferentes objetos.

4.2 Comportamientos proambientales

El estudio, con base a la normatividad ambiental y evidencia estadística, concluye que alrededor de la mitad de la población urbana posee prácticas proambientales inadecuadas respecto a la gestión ambiental en el hogar, acceso a servicios de agua y prácticas de sanidad e higiene en la vivienda, denotando no sólo la precariedad de la conciencia ambiental de la población, sino también la cobertura limitada e ineficacia de las acciones de promoción ambiental que implementa el gobierno local y la institucionalidad ambiental regional.

Sobre el comportamiento proambiental (Sandoval y col., 2019) en el caso colombiano, muestran que los estudiantes universitarios poseen actitudes y creencias ambientales positivas en la mayoría de las dimensiones; en tanto que Vilca y col. (2021) muestran que los estudiantes universitarios de Juliaca-Perú poseen dos estructuras conductuales emergentes que describen el comportamiento proambiental de acciones evitativas (reducción de basura, ahorro de energía y agua) o benéficas (reciclaje, reutilización y segregación). Por otra parte, Hernández y col. (2001) identifican incongruencias en el actuar del personal de área silvestre protegida de Costa Rica, puesto que prefieren adquirir productos desechables y empacados y utilizar el papel sólo de un lado, pero expresan un comportamiento favorable al ahorro de agua y energía, así como la separación del plástico, aluminio y papel. Ante esta situación o comportamiento dual, Berenguer y Corraliza (2000) sostienen que no existe un modelo único de predicción de la conducta ambiental, y que a las personas les cuesta actuar en favor del medio ambiente a pesar de reconocer la gravedad de los problemas (Moreno, Corraliza y Ruiz, 2005).

4.3 Relación entre preocupaciones y comportamientos proambientales

Los resultados del estudio, con base a la normatividad ambiental vigente y la evidencia estadística, muestran que las preocupaciones ambientales positivas no tienen su correlato en comportamientos proambientales adecuados, indicando no sólo la precariedad de la conciencia ambiental de la población, sino también el sentido de corresponsabilidad de la cobertura limitada e ineficacia de las acciones de promoción ambiental que implementa el gobierno local y la institucionalidad ambiental regional.

Esta situación es corroborada por Rivera-Jacinto y Rodríguez-Ulloa (2009), quienes demuestran que aun cuando los estudiantes universitarios del norte del país tienen actitudes ambientales positivas, estas no se traducen necesariamente en comportamientos proambientales adecuados. En tanto que Bernedo Berríos y Cazorla Galdos (2020), en un estudio realizado en Tacna-Perú, muestran que existe una relación directa y significativa (Rho de Spearman=0,614 y p=0,000) entre la preocupación ambiental y la conducta ecológica de los estudiantes; de manera similar (Suárez y col., 2007) en el caso mexicano, señalan la existencia de una relación significativa entre las actitudes ambientales y la motivación para actuar proambientalmente; además, Favara y Moreno (2020) sostienen que los adultos mayores con mayor afinidad emocional (relación de carácter emocional con la naturaleza) y mayor conectividad (interés por conocer la naturaleza y estar en contacto con ella) tienen mayor tendencia a realizar conductas proambientales. Sin embargo, Álvarez y Vega (2009) muestran que las actitudes y conductas ambientales presentan correlaciones muy bajas, pese a que las actitudes tienen gran influencia sobre el comportamiento si otros factores no impiden a que éste se materialice.

En España, Amérigo, Aragonés y García (2012) y Amérigo y García (2014) en el análisis de la relación de actitudes y conductas ambientales, encuentran predictores de la conducta proambiental; a su vez Murga (2008) y Vázquez y Manassero (2009) sostienen que las actitudes ambientales de los jóvenes son positivas, pero con algún aspecto pesimista, dado que la predisposición a actuar en favor del medio ambiente (conducta ecológica) es baja en relación a

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

la preocupación mostrada. Asimismo, (Palavecinos y col., 2016) sostienen que la estructura de las actitudes y preocupación ambiental entre estudiantes de Chile y España son similares, con las mismas dimensiones y tipos de conducta; así como en la conducta humana de los jóvenes tienen una mayor prioridad porque las actitudes son fáciles de modificar o adecuar (Pérez-Franco, Pro-Bueno y Pérez-Manzano, 2018).

Para la mejora sostenible de actitudes y comportamientos proambientales de los actores sociales e institucionales, es imperativo el diseño de una nueva política pública de fortalecimiento de capacidades en educación ambiental y ecológica, cuya implementación, bajo el liderazgo de la institucionalidad ambiental local y regional, incorpore la participación efectiva de la sociedad civil con base a un sistema de incentivos. Para lo cual, resulta fundamental considerar las propuestas realizados en el contexto latinoamericano: la edu-comunicación para el desarrollo sostenible (Rendón y col., 2018); el registro fotográfico (Perdomo Báez, Salazar Báez y Fernández, 2018); el juego o juegos de mesa (Sanabria, Sandoval y Arango, 2017); la educación ambiental con enfoque integrador e interdisciplinario (Paula, Pérez y Sierra, 2019; Álvarez y Vega, 2009); educar con ética y valores ambientales (Castro, Cruz y Ruiz, 2009). Por otra parte, frente al creciente proceso de contaminación de la bahía del lago Titicaca por la deficiente gestión del RSU y aguas residuales y el colapso de las lagunas de oxidación y sus efectos en la salud humana y el ambiente, es importante considerar las acciones y propuestas que se vienen realizando: la estrategia de reciclar antes de desechar (Aliaga Ortega, 2017); acciones de manejo de residuos sólidos (Olaguez y col., 2019); la estrategia de la investigación-acción-participativa (Rodríguez y col., 2018); la corresponsabilidad de las organizaciones de la sociedad civil en algunas etapas del MRSU (De Cármen y col., 2019). En definitiva, dichas propuestas, estrategias o marcos metodológicos sometidos a un análisis crítico, deberán ser validados en concordancia con el contexto sociocultural andino y del altiplano puneño.

Contribución de los autores

JETQ; Conceptualización, investigación, análisis formal, metodología, validación, visualización, preparación, creación y presentación del trabajo, redacción del borrador original y de la versión final del manuscrito.

Referencias

Agenda 21 (1992). *Programa de Naciones Unidas (ONU) para Promover el Desarrollo Sostenible*.

Aliaga Ortega, W. (2017). «Incidencia de Gestión Ambiental con la Contaminación por Residuos Sólidos de la Bahía Interior del Lago Titicaca Puno». En: *Revista Científica Investigación Andina* 16.2, 67-79. Online:https://n9.cl/2giwk.

Álvarez, P. y P. Vega (2009). «Actitudes ambientales y conductas sostenibles: implicados para la educación ambiental». En: *Revista de Psicodidáctica* 14.2, 245-260. Online:https://n9.cl/u6eht.

Amérigo, M., J. Aragonés y J. García (2012). «Explorando las dimensiones de la preocupación ambiental. Una propuesta integradora». En: *PsyEcology* 3.3, 299-311. Online:https://n9.cl/lt3sf.

Amérigo, M. y J. García (2014). «Perspectiva multidimensional de la preocupación por el medio ambiente. Relación entre dimensiones actitudinales y comportamientos». En: *Psico* 45.3, 406-414. Online:https://n9.cl/3h9fb.

Amérigo, M., J. García y P. Cortes (2017). «Análisis de actitudes y conductas pro-ambientales: un estudio exploratorio con una muestra de estudiantes universitarios brasileños». En: *Ambiente & Sociedade* 20, 01-20. Online:https://n9.cl/kttmc.

Amérigo, M. y col. (2005). «La estructura de las creencias sobre la problemática medioambiental». En: *Psicothema* 17.2, 257-262. Online:https://n9.cl/msl9v.

Andrade Salazar, J.A. y J. Gonzales Portillo (2019). «Relación entre actitudes pro-ambientales y conocimientos ecológicos en adolescentes con relación al entorno rural o urbano que habitan». En: *Revista Kavilando* 11.1, 105-118. Online:https://n9.cl/3ft1u.

Aranibar Ramos, E. y A. Patiño Huayhua (2022). «Turismo, camino hacia la sostenibilidad: una aproximación al Lago Titicaca Peruano». En: *Revista de Ciencias Humanísticas y Sociales (ReHuSo)* 7.3, 46-62. Online:https://n9.cl/e4mve.

Berenguer, J. y J. Corraliza (2000). «Preocupación ambiental y comportamientos ecológicos». En: *Psicothema* 12.3, 325-329. Online:https://n9.cl/doiutq.

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Bernedo Berríos, S.M. y J.O. Cazorla Galdos (2020). «Preocupación ambiental y su relación con la conducta ecológica en estudiantes de ingeniería de la Universidad Privada de Tacna». En: *Ingeniería Investiga* 2.2, 418-430. Online:https://n9.cl/1gkbe.

Cantú, P. (2020). «Preocupación y deterioro de la calidad ambiental. Apreciación de los estudiantes universitarios». En: *Ambiente y desarrollo* 24.46, 24-26. Online:https://n9.cl/7t5y0.

Castro, A. de, J. Cruz y L. Ruiz (2009). «Educar con ética y valores ambientales para conservar la naturaleza». En: *Convergencia* 16.50, 353-382. Online:https://n9.cl/dhmi80.

Clayton, S. (2003). «The Psychological Significance of Nature». En: The MIT Press. Cap. Environmental Identity: A Conceptual and an Operational Definition, 45–65.

De Cármen, V. y col. (2019). «La importancia de la participación y corresponsabilidad en el manejo de los residuos sólidos urbanos». En: *Acta universitaria* 29, 1-16. Online:https://n9.cl/leysl.

Dunlap, R. y col. (2000). «New trends in measuring environmental attitudes: measuring endorsement of the new ecological paradigm: a revised NEP scale». En: *Journal of social issues* 56.3, 425-442. Online:https://n9.cl/fb81c.

Estrada, E. y col. (2021). «La preocupación ambiental en estudiantes de educación superior de Madre de Dios, Perú». En: *Ciencia Amazónica (Iquitos)* 9.1, 111-122. Online:https://n9.cl/b9mjl.

Favara, J. y J. Moreno (2020). «Preocupación ambiental y conductas proambientales en jóvenes y adultos mayores». En: *Revista de psicología (Santiago)* 29.1, 80-89. Online:https://n9.cl/8o6wp.

Flores, E., M. Miranda y M. Villasís (2017). «El protocolo de investigación VI: cómo elegir la prueba estadística adecuada. Estadística inferencial». En: *Revista Alergia México* 64.3, 364-370. Online:https://n9.cl/lxfyi.

Fontúrbel-Rada, F. (2003). «Algunos criterios biológicos sobre el proceso de eutrofización a orillas de seis localidades del lago Titikaka». En: *Ecología aplicada* 2.1, 75-79. Online:https://n9.cl/d7qex.

Franzen, A. y D. Vogl (2013). «Two decades of measuring environmental attitudes: A comparative analysis of 33 countries». En: *Global Environmental Change* 23.5, 1001-1008. Online:https://n9.cl/03svmk.

Hernández, B. y col. (2001). «Sistemas de creencias ambientales: un análisis multi-muestra de estructuras factoriales». En: *Estudios de psicología* 22.1, 53-64. Online:https://n9.cl/kksoj.

Instituto Nacional de Estadística e Informática (2018). *Anuario de Estadísticas Ambientales 2018*. Online:https://n9.cl/zx36d.

Jimenez, L., F. Jahuira y V. Ibañez (2016). «Tratamiento de aguas eutrofizadas de la bahía interior de Puno, Perú, con el uso de dos Macrófitas». En: *Revista de Investigaciones Altoandinas* 18.4, 403-410. Online:https://n9.cl/92oit.

Kals, E., D. Schumacher y L. Montada (1999). «Emotional affinity toward nature as a motivational basis to protect nature». En: *Environment and behavior* 31.2, 178-202. Online:https://n9.cl/zug1r6.

Luca, E. y B. Ticona (2006). «La contaminación del lago Titicaca y el turismo». Tesis doct. Escuela Postgrado UNA Puno.

Milfont, T. y J. Duckitt (2010). «The environmental attitudes inventory: A valid and reliable measure to assess the structure of environmental attitudes». En: *Journal of environmental psychology* 30.1, 80-94. Online:https://n9.cl/ckb3u.

Miranda Aliaga, A. (2004). «Efectos de la contaminación de la bahía interior de Puno en la salud humana, 2003». En: *Revista Científico Social* 1.1.

Moreno, J., L. Rodriguez y J. Favara (2019). «Conciencia ambiental en estudiantes universitarios. Un estudio de la jerarquización de los ODS». En: *Rev. de Psicología* 30.1, 113–119 . Online:https://n9.cl/x2u1fi.

Moreno, M., J. Corraliza y J. Ruiz (2005). «Escala de actitudes ambientales hacia problemas específicos». En: *Psicothema* 17.3, 502-508. Online:https://n9.cl/dhsas.

Murga, M. (2008). «Percepciones, valores y actitudes ante el desarrollo sostenible. Detección de necesidades educativas en estudiantes universitarios». En: *Revista española de pedagogía* 66.240, 327-343. Online:https://n9.cl/o72qyr.

Olaguez, E. y col. (2019). «Plan de Acción a Partir de la Percepción en Estudiantes de la Universidad Politécnica de Sinaloa ante el Reciclaje de Residuos Sólidos y la Educación Ambiental». En: *Formación universitaria* 12.3, 3-14. Online:https://n9.cl/a4bzl.

Organización Mundial de la Salud (2019). *Estado Mundial del Saneamiento*. Online:https://n9.cl/9siaz. UNICEF-OMS.

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Palavecinos, M. y col. (2016). «Preocupación y conducta ecológica responsable en estudiantes universitarios: estudio comparativo entre estudiantes chilenos y españoles». En: *Psychosocial Intervention* 25.3, 143-148. Online:https : / / n9 . cl / b2nh8.

Paula, C., J. Pérez y J. Sierra (2019). «La educación ambiental con enfoque integrador. Una experiencia en la formación inicial de profesores de matemática y física». En: *Revista Electrónica Educare* 23.1, 181-202. Online:https://n9.cl/13u7p.

Perdomo Báez, O., P. Salazar Báez y L. Fernádez (2018). «Avifauna local: una herramienta para la conservación, el ecoturismo y la educación ambiental». En: *Ciencia en Desarrollo* 9.2, 17-34. Online:https://n9.cl/0jf3m.

Pérez-Franco, D., A. de Pro-Bueno y A. Pérez-Manzano (2018). «Actitudes ambientales al final de la ESO». En: *Un estudio diagnóstico con alumnos de Secundaria de la Región de Murcia. Rev. Eureka Sobre Enseñ. Divulg. Las Cienc* 15, 1-15. Online:https://n9.cl/5uko.

Rendón, L. y col. (2018). «Educación para el desarrollo sostenible: acercamientos desde una perspectiva colombiana». En: *Producción+ Limpia* 13.2, 133-149. Online:https://n9.cl/3iw3t.

Ritchey, F. (2002). *Econometric Analysis*. McGraw-Hill.

Rivera-Jacinto, M. y C. Rodríguez-Ulloa (2009). «Actitudes y comportamientos ambientales en estudiantes de enfermería de una universidad pública del norte del Perú». En: *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Pública* 26.3, 338-342. Online:https://n9.cl/95ncyn.

Rodríguez, A. y col. (2018). «Sensibilización en el manejo de residuos sólidos mediante la investigación-acción participativa». En: *Módulo Arquitectura-CUC* 20.1, 29-38. Online:https://n9.cl/ue33b.

Sanabria, I., L. Sandoval y A. Arango (2017). «El juego como estrategia para la enseñanza y el aprendizaje de la evolución biológica en estudiantes de noveno grado». En: *Bio-grafía* 10.19, 146-152. Online:https://n9.cl/7ambk.

Sandoval, M. y col. (2019). «Paradojas del comportamiento proambiental de los estudiantes universitarios en diferentes disciplinas académicas». En: *Interdisciplinaria* 36.2, 165-184. Online:https://n9.cl/62hgy.

Schultz, P. (2001). «The structure of environmental concern: Concern for self, other people, and the biosphere». En: *Journal of environmental psychology* 21.4, 327-339. Online:https://n9.cl/1vtb6.

Suárez, E. y col. (2007). «¿Qué motiva la valoración del medio ambiente? La relación del ecocentrismo y del antropocentrismo con la motivación interna y externa». En: *Revista de Psicología social* 22.3, 235-243. Online:https://n9.cl/q8um7.

Thompson, S. y M. Barton (1994). «Ecocentric and anthropocentric attitudes toward the environment». En: *Journal of environmental Psychology* 14.2, 149-157. Online:https://n9.cl/ztzoll.

Tumi Quispe, J. (2014). «Representaciones sociales de la población de la ciudad de Puno sobre gestión de residuos sólidos». En: *Revista de Investigaciones Altoandinas-Journal of High Andean Research* 16.01, 59–74. Online:https://n9.cl/0jos7.

— (2016). «Actitudes y prácticas ambientales de la población de la ciudad del Puno, Perú sobre gestión de residius sólidos.» En: *Espacio abierto: cuaderno venezolano de sociología* 25.4, 267-285. Online:https://n9.cl/lhlgp.

Valderrama, A. y A. Canales (2007). «Impacto del manejo de residuos sólidos sobre la salud familiar en la bahía de la ciudad de Puno». En: *Revista Investigación* 3.3.

Vargas, C., M. Martínez y M. Fernández (2019). «Actitudes ambientales en los estudiantes de nivel superior en México». En: *Luna Azul* 15.35, 45–49. Online:https://n9.cl/m6vhv.

Vázquez, Á. y M. Manassero (2008). «El declive de las actitudes hacia la ciencia de los estudiantes: un indicador inquietante para la educación científica». En: *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las ciencias* 5.3, 274-292. Online:https://n9.cl/bthkxq.

Vázquez, A. y M. Manassero (2009). «La relevancia de la educación científica: actitudes y valores de los estudiantes relacionados con la ciencia y la tecnología». En: *Enseñanza de las ciencias: revista de investigación y experiencias didácticas* 27.1, 33-48. Online:https://n9.cl/s7e9v.

Velásquez Patiño, A. (2008). «La gestión de los residuos sólidos urbanos en la ciudad de Hannover: un modelo exitoso». En: *Anales de geografía de la Universidad Complutense* 28.1, 163-177. Online:https://n9.cl/92as6.

Vilca, G. y col. (2021). «Comportamiento proambiental en una muestra cualitativa de estudiantes universitarios de Juliaca-Perú». En: *Revista Científica de la UCSA* 8.2, 39-50. Online:https://n9.cl/3if71.

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Vining, J., M. Merrick y E. Price (2008). «The distinction between humans and nature: Human perceptions of connectedness to nature and elements of the natural and unnatural». En: *Human Ecology Review* 15.1, 1-11. Online:https://n9.cl/rmsaf.

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Apéndice

Tabla 1. Actitud ambiental positiva de la población urbana de Puno por dimensiones y categorías de análisis y según grado de instrucción y género

Dimensión	Variable	Actitud positiva						
		Total		Grado instrucción (%)			Género (%)	
		N°	%	Prim	Sec	Sup	Varón	Mujer
Factores contaminación en la vivienda	Calidad del agua	356	93,2	95,0	93,9	92,7	91,7	94,7
	Recogido de basura	338	88,5	100,0	90,0	86,7	86,0	91,0
	Calles sin pavimentar	213	55,8	65,0	52,6	56,5	57,0	54,5
	Animal domést. vivienda	266	69,6	55,0	64,9	73,0	66,3	73,0
	Obstrucción alcantarilla	264	69,1	75,0	59,6	73,0	67,9	70,4
Fuentes de contaminación de la bahía del lago Titicaca	Aguas residuales	296	77,5	85,0	68.4	81,0	82,4	72,5
	Residuos sólidos	217	56,8	75,0	45,6	60,5	60,1	53,4
	Colapso lag. oxidación	322	84,3	100,0	82,5	83,9	86,5	82,0
Efectos de la contaminación en la salud humana	Síntomas neuro psíquicas	267	69,9	60,0	53,5	78,2	74,6	65,1
	Síntomas digestivos	253	66,4	50,0	51,8	74,5	69,8	63,0
	Síntomas dermatológicos	144	37,7	5,0	17,5	49,6	43,0	32,3
	Síntomas oculares	138	36,1	10,0	19,3	46,0	40,9	31,2

Fuente: Encuesta socioambiental, Puno, 2018.

Tabla 2. Práctica ambiental de la población sobre disposición de residuos sólidos según grado de instrucción y género

Variable	Categoría	Total		Grado instrucción			Género	
		N°	%	Prim.	Sec.	Sup.	Varón	Mujer
Tipo de recipiente para almacenar RSU	Recip. Impermeab con tapa	101	26,4	0,0	25,4	29,0	25,4	27,5
	Bolsas de polietileno	254	66,5	100,0	69,3	62,5	66,8	66,1
	Otro tipo de recipiente	27	7,1	0,0	5,3	8,5	7,8	6,3
Lugar en la vivienda donde almacena RS	Patio	295	77,2	80,0	75,4	77,4	78,2	75,7
	Cocina	21	5,5	10,0	6,1	4,8	3,1	7,9
	Otro	66	17,3	10,0	18,4	17,7	18,7	16,4
Periodicidad de evacuación de RS	Diario	49	12,8	10,0	12,3	13,7	15,5	10,6
	Interdiario	225	58,9	50,0	58,8	59,3	52,8	64,6
	Semanal	108	28,3	40,0	28,9	27,0	31,6	24,9
Disposición final de RS	Contened. en forma directa	177	46,3	35,0	40,4	49,6	45,6	46,6
	Dep. colect. fuera vivienda	162	42,4	50,0	53,5	37,1	39,9	45,5
	Al frente de su vivienda	21	5,5	10,0	4,4	5,6	6,7	4,2
	Otro	22	5,8	5,0	1,8	7,7	7,8	3,7
Frecuencia lavado manos después de manipular RS	Siempre	312	81,7	60,0	82,5	83,1	80,8	82,5
	A veces	69	18,1	35,0	17,5	16,9	18,7	17,5
	Casi nunca	1	0,2	5,0	0,0	0,0	0,5	0,0

Fuente: Encuesta socio-ambiental; Puno, 2018.

LA GRANJA: *Revista de Ciencias de la Vida* 39(1) 2024:43-62.
©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Tabla 3. Condiciones de acceso a servicios de agua en la vivienda según grado de instrucción y género

Variable	Categoría	Total		Grado instrucción			Género	
		N°	%	Prim.	Sec.	Sup.	Varón	Mujer
Fuente de provisión de agua en la vivienda	Red pública	362	94,7	90,0	93,0	96,0	92,7	96,8
	Pozo	14	3,7	10,0	4,4	2,8	4,7	2,6
	Pileta pública	4	1,1	0,0	1,8	0,8	2,1	0,0
	Otro	2	0,5	0,0	0,9	0,4	0,5	0,5
Acceso y distribuc. domiciliaria de agua	No tiene acceso	8	2,1	30,0	28,9	33,9	33,2	31,2
	Permanente	122	31,9	65,0	69,3	64,1	62,7	68,8
	Por horas al día	252	66,0	5,0	1,8	2,0	4,19	0,0
Serv. Hig. instalado y operativo	Instalados	371	97,1	95,0	97,4	97,2	95,9	98,4
	Operativos	374	97,9	95,0	98,0	98,0	96,4	99,5

Fuente: Encuesta socio-ambiental; Puno, 2018.

Tabla 4. Prácticas de sanidad e higiene de la población urbana de Puno según grado de instrucción y género

Variable	Categoría	Total		Grado instrucción (%)			Género (%)	
		N°	%	Prim	Sec	Sup.	Varón	Mujer
Forma de almacenamiento de agua en domicilio	Tanque de polietileno	169	44,2	10,0	33,3	52,0	48,2	40,2
	Tanque de cemento	19	5,0	5,0	1,8	6,5	3,6	6,3
	Cubos de plástico	72	18,8	35,0	31,6	11,7	21,2	16,4
	Cilindros	28	7,3	10,0	5,3	8,1	7,3	7,4
	Baldes	94	24,6	40,0	28,1	21,8	19,7	29,6
Desinfección del agua de beber en el hogar	Hierbe, desinf. y filtra	55	14,4	0,0	8,8	18,1	18,1	10,6
	Sólo hierve	312	81,7	95,0	90,4	76,6	76,7	86,8
	Sólo desinfecta	15	3,9	5,0	0,9	5,2	5,2	2,6
Tapado recipiente de almacenaje de agua de beber	SI	348	91,1	95,0	91,2	90,7	92,7	89,4
	NO	34	8,9	5,0	8,8	9,3	7,3	10,6
Lugar de evacuación de heces	Baños del domicilio	369	96,6	90,0	98,2	99,6	98,4	98,9
	Baño público	1	0,3	0,0	0,0	0,4	0,5	0,0
	Al aire libre	3	0,8	5,0	0,0	0,0	0,5	0,0
	Bahía del lago Titicaca	9	2,4	5,0	1,8	0,0	0,5	1,1
Frecuencia de limpieza de baño	Diario	115	30,1	5,0	19,3	37,1	32,6	27,5
	Interdiario	146	38,2	50,0	55,3	29,4	36,3	40,2
	Semanal	118	30,9	40,0	25,4	32,7	29,5	32,3
	Otro	3	0,8	5,0	0,0	0,8	1,6	0,0

Fuente: Encuesta socio-ambiental; Puno, 2018.

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Tabla 5. Valoración de las actitudes y prácticas ambientales de la población (distribución de frecuencias y análisis de correlación).

Distribución de frecuencias					
Valoración		**Frecuencia**	**Porcentaje**	**Porcentaje válido**	**Porcentaje acumulado**
ACTITUDES	Positiva	237	62,0	62,0	62,0
	Negativa	145	38,0	38,0	100,0
PRÁCTICAS	Adecuada	171	44,8	44,8	44,8
	Inadecuada	211	55,2	55,2	100,0
	Total	**382**	**100,0**	**100,0**	

Dimensiones y variables de análisis de las prácticas ambientales de la población				
Variables Independientes	**Valor**	**Gl**	**Sig. asintótica (2 caras)**	**Pregunta**
Prácticas ambientales de la familia en el hogar [PAF]				
Tipo de recipiente almacenamiento de RS	5,573	2	0,062	23
Lugar de almacenamiento de la basura	3,377	2	0,185	24
Periodicidad de evacuación de residuos sólidos	3,390	2	0,213	25
Disposición final de los residuos sólidos	1,183	3	0,757	26
Frecuencia lavado manos después manipular RS	2,351	2	0,309	28
Condiciones de acceso a servicios de agua [ASH]				
Fuente de provisión de agua en la vivienda	2,111	3	0,550	29
Grado de acceso y distribución de agua segura	3,899	2	0,142	33
Instalación de servicios higiénicos en vivienda	0,549	1	0,459	34
Servicios Higiénicos operativos en la vivienda	0,583	1	0,445	35
Prácticas de sanidad e higiene en el hogar [PSH]				
Forma de almacenamiento agua en domicilio	20,635	4	0,000	30
Acciones desinfección agua de beber en hogar	29,257	2	0,000	31
Tapa recipientes almacenaje de agua de beber	1,158	1	0,282	32
Lugar de evacuación de heces	2,274	3	0,518	27
Frecuencia de limpieza del baño	11,565	3	0,009	36
Localización y estatus socioeconómico				
Localización espacial de la vivienda	89,869	3	0,000	38
Estatus económico (Ocupación)	52,562	5	0,000	7
Estatus social (Grado de instrucción)	44,536	2	0,000	5
Genero	5,637	1	0,018	4

Fuente: Encuesta socio-ambiental; Puno, 2018.

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

La Granja:
Revista de
Ciencias de la Vida
pISSN:1390-3799; eISSN:1390-8596
http://doi.org/10.17163/lgr.n39.2024.04

Número Especial/ Special Issue

Desarrollo Sostenible

CC BY NC SA

Una perspectiva del desarrollo hidroeléctrico en Ecuador: pasado, presente y futuro

A hydropower development perspective in Ecuador: Past, present, and future

Sebastian Naranjo-Silva

Departamento de Gestión de Carreteras; Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España

*Autor para correspondencia: hector.sebastian.naranjo@upc.edu.ec

Manuscrito recibido el 03 de noviembre de 2021. Aceptado, tras revisión, el 27 de octubre de 2023. Publicado el 1 de marzo de 2024.

Resumen

Ecuador es un pequeño país andino ubicado en el hemisferio occidental de América del Sur. El país cuenta con 361.747 hm^3 anuales de recursos hídricos superficiales. Como resultado, Ecuador, en los últimos quince años (2005 a 2020), ha estado desarrollando proyectos hidroeléctricos para triplicar la producción en esta fuente renovable. Hubo ocho nuevas centrales hidroeléctricas construidas en Ecuador entre 2007 y 2015, en donde se invirtieron cerca de USD 6 mil millones en los proyectos, lo que incrementó la respuesta energética con renovables; por ejemplo, en 1985 el país produjo 4 TWh, en 2005 registró 7 TWh y hasta 2020, 24 TWh. Según la Corporación de Electricidad del Ecuador en 2020 informó que generó alrededor del 80 % de toda la electricidad a través de hidroelectricidad. Así, el artículo tiene como objetivo analizar críticamente el desarrollo de la energía hidroeléctrica en Ecuador en los últimos años y establecer proyecciones energéticas generales al 2030 para ampliar los campos de conocimiento y perspectivas. La metodología del trabajo es cuantitativa, de acuerdo con fuentes editoriales científicas, artículos, documentos de investigación, y recolecta datos de agencias gubernamentales que regulan el desarrollo energético en Ecuador. Se concluye que, mediante un cálculo de proyecciones, Ecuador necesitará para el año 2030 alrededor de 43 TWh, 47 TWh o 52 TWh para abastecer la red energética, según los escenarios propuestos (bajo, medio, alto). Si bien la energía hidroeléctrica será fundamental para contribuir a este requerimiento, el país tiene una barrera porque la energía hidroeléctrica es muy sensible a factores externos de diversa índole, generando un futuro incierto directamente asociado a los efectos climáticos.

Palabras clave: Ecuador, energías renovables, desarrollo hidroeléctrico, perspectiva, proyecciones.

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Abstract

Ecuador is a small Andean country located in the western hemisphere of South America. The country has $361,747 hm^3$ annual superficial water resources; As a result, Ecuador, in the last fifteen years (2005 to 2020), has been rapidly developing hydropower projects to triple the production in this renewable source. There were eight new hydroelectric plants constructed in Ecuador among 2007 and 2015 invested close to USD 6 billion the projects. Increased the energy response with renewables; for example, in 1985, the country produced 4 TWh, in 2005-registered 7 TWh, and to 2020, 24 TWh. According to the Electricity Corporation of Ecuador in 2020 reported that generated around 80% of all electricity through hydropower; thus, the article aims to critically analyze the development of hydropower in Ecuador in recent years and establish general energy projections to 2030 to expand the fields of knowledge and perspectives. The paper methodology is quantitative, according to scientific editorial sources, articles, investigative documents, and collects data from government agencies that regulate energy development in Ecuador. It is conclusive between a projection's calculation, Ecuador will need for the year 2030 around 43 TWh, 47 TWh, or 52 TWh to supply the energy grid, according to the scenarios proposed (low, medium, high). Although hydropower will be essential to contribute to this requirement, the country has a barrier because hydropower is very sensitive to external factors of diverse nature, generating an uncertainly future directly associated with climatic effects.

Keywords: Ecuador, renewable energies, hydropower development, perspective, projections.

Forma sugerida de citar: Naranjo-Silva, S. (2024). Una perspectiva del desarrollo hidroeléctrico en Ecuador: pasado, presente y futuro. La Granja: Revista de Ciencias de la Vida. Vol. 39(1):63-77. http://doi.org/10.17163/lgr.n39.2024.04.

IDs Orcid:

Sebastian Naranjo-Silva: https://orcid.org/0000-0002-1430-8140

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

1 Introducción

Ecuador es un pequeño país andino ubicado en el hemisferio occidental, al noroeste de Sudamérica, y está compuesto por tres regiones principales: Costa, Sierra y Amazonía (Ministerio de Medio Ambiente, Agua y Transición ecológica, 2019). Ecuador se caracteriza por poseer una topografía única, una diversidad de zonas climáticas y una población prolífica de especies animales. Según el Ministerio de Ambiente y Agua de Ecuador (MAATE), la riqueza biológica se refleja en una amplia gama de organismos, y el 10% de las especies de proyectos vasculares en la biosfera se encuentran en una zona que apenas representa el 2% de la superficie global (Guilcatoma-Aimacaña, 2010; Mena-Vasconez, 2018). El país cuenta con 376 018 Hm^3 de recursos hídricos anuales, de los cuales 361,747 hm^3 son superficiales mientras que el resto son subterráneos (Hasan y Wyseure, 2018). Además, el volumen promedio anual para las regiones del país, Costa, Sierra y Amazonía es de 70,046 hm^3, 59,725 hm^3, y 246,246 hm^3, respectivamente (CISPDR y SENAGUA, 2016).

Por otra parte, con la disponibilidad de recursos hídricos superficiales, el Ecuador ha venido desarrollando proyectos hidroeléctricos para triplicar la producción en los últimos quince años (2005 a 2020), como se indica en la Figura 5. En 1985 el país produjo 4 TWh, en el 2005 registró 7 TWh, y en el 2020 24 TWh de energía hidroeléctrica. La Corporación de Electricidad del Ecuador (CELEC) informó en el 2020 que el país generaba alrededor del 80% de toda la energía a través de la energía hidroeléctrica, por lo que la energía hidroeléctrica es una fuente crucial para satisfacer la demanda nacional (CELEC, 2020). Por otro lado, se construyeron ocho centrales hidroeléctricas nuevas en Ecuador entre 2007 y 2015, en donde se invirtieron cerca de USD 6 mil millones, duplicando su capacidad (Vaca-Jiménez, Gerbens y Nonhebel, 2020). En 2017 se inauguró el Coca Codo Sinclair, conocido como el mayor proyecto con 1 500 MW de capacidad, que suministra el 30% de la energía hoy en día en el país con todas las turbinas generadoras (Álvarez-Chiriboga, 2020).

Sin embargo, Ecuador es muy sensible a factores externos de diversa naturaleza como inundaciones, tsunamis, terremotos y lluvias extremas debido a componentes atmosféricos, la ubicación geográfica, la orografía accidentada y las características meteorológicas prevalecientes que pueden causar graves impactos en la economía (Naranjo Silva, Punina y Morales, 2021; Purcell y Martínez, 2018). Sin embargo, ante fenómenos naturales impredecibles, el cambio climático intensifica la variabilidad meteorológica natural, afectando las instalaciones hidroeléctricas (Álvarez-Chiriboga, 2020; Hidalgo y col., 2024). A finales de los años 80 se empezó a discutir sobre el medio ambiente y se amplió el interés en políticas de crecimiento basadas en la calidad y la gestión de las fuentes renovables (Tang, Li y Tu, 2018). Sin embargo, los efectos de estas fuentes renovables son lentos, cuantificados y verificados, generando un nuevo problema a analizar (Jin, Andersson y Zhang, 2016).

En este contexto, este artículo tiene como objetivo analizar el desarrollo hidroeléctrico en Ecuador en los últimos años y establecer las proyecciones generales de energía hasta el año 2030 para ampliar los campos del conocimiento y discernir la perspectiva de esta fuente renovable llevada a cabo rápidamente en un país en vías de desarrollo.

2 Energía hidroeléctrica en el mundo

Según la Asociación Internacional de Hidroenergía (IHA por sus siglas en inglés), la capacidad hidroeléctrica mundial en el 2020 era de 1.330 GW (International Hydropower Association, 2021). Además, esta fuente renovable en el 2020 reportó alrededor de 14.000 proyectos activos en 180 países (ICOLD, 2019; Llamosas y Sovacool, 2021). Además, el informe de la IHA menciona que en el 2020 hubo un aumento de 21 GW en la capacidad total instalada de energía hidroeléctrica, lo que supone un aumento del 1,6% en comparación con 2019 (International Hydropower Association, 2021). De acuerdo con Killingtveit (2018), se espera que el desarrollo hidroeléctrico aumente. En la Figura 1 se puede observar la tendencia de crecimiento porcentual promedio en alrededor del 3% entre 2007 y 2016.

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

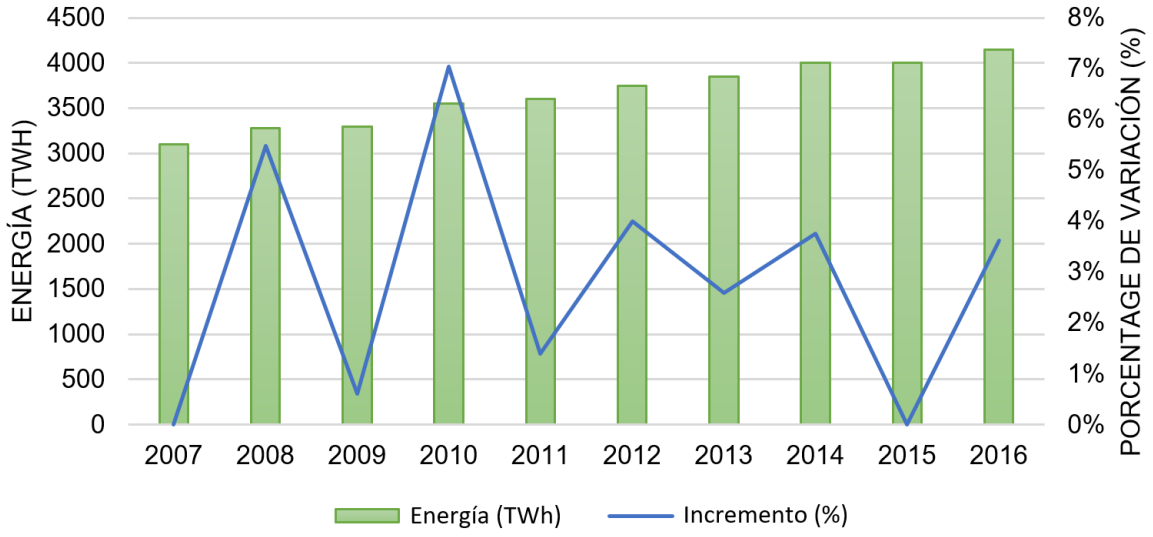

Figura 1. Crecimiento hidroeléctrico mundial TWh período 2007 - 2016.
Fuente: International Renewable Energy Agency (2020) y Killingtveit (2018).

De igual forma, la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA) determina que la evolución media de la capacidad instalada en los cinco años comprendidos entre 2016 y 2020 fue del 1,8% (IRENA, 2020). Sin embargo, a nivel mundial, un cálculo realizado en el 2017 estimó que solo el 22% del potencial hidroeléctrico y el 4,2% de las energías renovables restantes se utilizan actualmente (Turner, Kim y Edmonds, 2017). Además, el potencial de producción de energía hidroeléctrica amplificada es suficiente para cumplir un despliegue real a largo plazo que se calcula en más de 8.000 TWh para 2050 (Schaefli, 2015).

La hidroenergía se define como una tecnología madura y la más utilizada entre las renovables, aunque la proporción ha disminuido lentamente a nivel mundial (Naranjo Silva y Álvarez, 2021). La cuota global de energía hidroeléctrica cayó del 72% en 2010 (881 GW) al 41% en 2020 (1.153 GW), excluyendo la energía hidroeléctrica de tipo bombeado a pesar del aumento de la capacidad instalada (IRENA, 2021). Actualmente, la energía hidroeléctrica es número uno en la mayoría de los países de América Latina, Asia y Europa, pero existen riesgos significativos debido a la disponibilidad de agua (Lu y col., 2020; Teräväinen, 2019).

3 Metodología

A nivel mundial existe mucha literatura que abarca protocolos, manuales y proyecciones que lideran o mitigan los impactos hidroeléctricos, por lo que, en un mundo de tecnología y cambios constantes, existen diversas reflexiones y enfoques sobre el tema. Por tanto, la metodología propuesta es cuantitativa, evaluando el desarrollo de proyectos hidroeléctricos instalados en Ecuador en los últimos años. En la parte cuantitativa, existen simulaciones y proyecciones según fuentes editoriales científicas, artículos y documentos de investigación definidos que abordan temas y aspectos como el desarrollo hidroeléctrico del Ecuador y las políticas energéticas. Así, se enumeran los valiosos documentos en función de los temas que contribuyen a este trabajo; las bases de datos analizadas se detallan en la Tabla 1.

Se seleccionaron tres repositorios digitales (Science Direct, Springer y Taylor Francis) por tener más información asociada a la energía hidroeléctrica como tema principal del presente manuscrito, y adicionalmente los datos cubrieron un periodo de tiempo específico (2016-2020). Después de la primera selección de datos científicos, se encontraron 76 publicaciones, incluyendo artículos de revistas, documentos de conferencias, libros e informes en lí-

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

nea. Debido a la falta de contribuciones cuantitativas, un gran número de documentos terminaron siendo omitidos de la primera búsqueda. Como criterio final se utilizaron artículos con simulaciones futuras, proyecciones con indicadores relevantes y recomendaciones de políticas. Además, la metodología de búsqueda utiliza frases clave como "desarrollo hidroeléctrico en Ecuador"; "proyecciones hidroeléctricas en Ecuador"; y "políticas energéticas ecuatorianas".

Tabla 1. Editorial científica analizadas.

Período	Repositorios digitales	Artículos seleccionados
2016-2020	Science Direct	11
2016-2020	Springer	9
2016-2020	Taylor & Francis	8
	Total	28

A lo largo de estos documentos, se resumen 28 trabajos seleccionados que abarcan diferentes áreas de aplicación en el desarrollo hidroeléctrico ecuatoriano. Adicionalmente, para conocer de fuentes directas los datos de los principales proyectos hidroeléctricos en Ecuador, se consultó a los siguientes organismos gubernamentales.

- Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables del Ecuador (MERN)
- Corporación Eléctrica del Ecuador (CELEC)

Los datos fueron analizados con artículos científicos e información de organismos gubernamentales que regulan el desarrollo energético en Ecuador, generando indicadores como consumo de energía anual, ratio de consumo per cápita y crecimiento hidroeléctrico. Por un lado, para la proyección energética del Ecuador, tomamos el caso base del año 2020, y según el registro histórico del Ministerio de Energía y Recursos No Renovables crece a una tasa porcentual de 4,9 %, y se incrementó un punto porcentual cuantitativo a la tendencia global a la expansión hidroeléctrica.

4 Resultados

Para abordar el tema, dividimos el artículo en dos temas significativos: el desarrollo hidroeléctrico ecuatoriano de los últimos años y las proyecciones de los países.

4.1 Desarrollo hidroeléctrico ecuatoriano en los últimos años

Entre 2007 y 2015, Ecuador invirtió USD 6.000 millones en ocho hidroeléctricas, más del doble de su capacidad (Vaca-Jiménez, Gerbens y Nonhebel, 2020); una de ellas fue Coca Codo Sinclair. Hoy en día este proyecto es el principal en Ecuador, con 1 500 MW de capacidad que suministra el 30 % de la energía actual en el país desde 2017 y que genera todas las turbinas (Álvarez-Chiriboga, 2020). Para ilustrar el desarrollo hidroeléctrico en Ecuador, la Figura 2 muestra principales cuencas y proyectos.

Asimismo, la IHA ubicó a Ecuador en el tercer lugar entre los países del mundo con nueva capacidad en 2016 (International Hydropower Association, 2018b). Además, la Corporación eléctrica de Ecuador informó en el 2020 que el 80 % de toda la energía es a través de la energía hidroeléctrica, como se muestra la Figura 3 con la tendencia de la red energética del país desde 2010 (CELEC, 2020).

En la Figura 3 se puede observar que hubo un aumento de más del doble de la producción de energía hidroeléctrica en los últimos diez años. Por ejemplo, en el 2010 Ecuador aportó alrededor de 8 000 GWh; en el 2020 se suministraron 24 000 GWh, lo que representó un aumento en el período de aproximadamente 300 %. Además de este aumento de la energía hidroeléctrica, la producción termoeléctrica se redujo en más del triple en el 2010, 9 000 GWh en comparación al 2020 con 2 000 GWh (CELEC, 2020; MERNNR, 2018).

Además, los datos de las estadísticas anuales de la British Petroleum Company en un análisis global del consumo de energía per cápita para el año 2019 establece que se requieren alrededor de 20 884 kWh per cápita a nivel mundial. Por el contrario, en Ecuador se necesitan 11 884 kWh per cápita; aproximadamente el 67 % representa la energía hidroeléctrica con 7 904 kWh per cápita, como indica la Figura 4 (BP p.l.c., 2020).

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

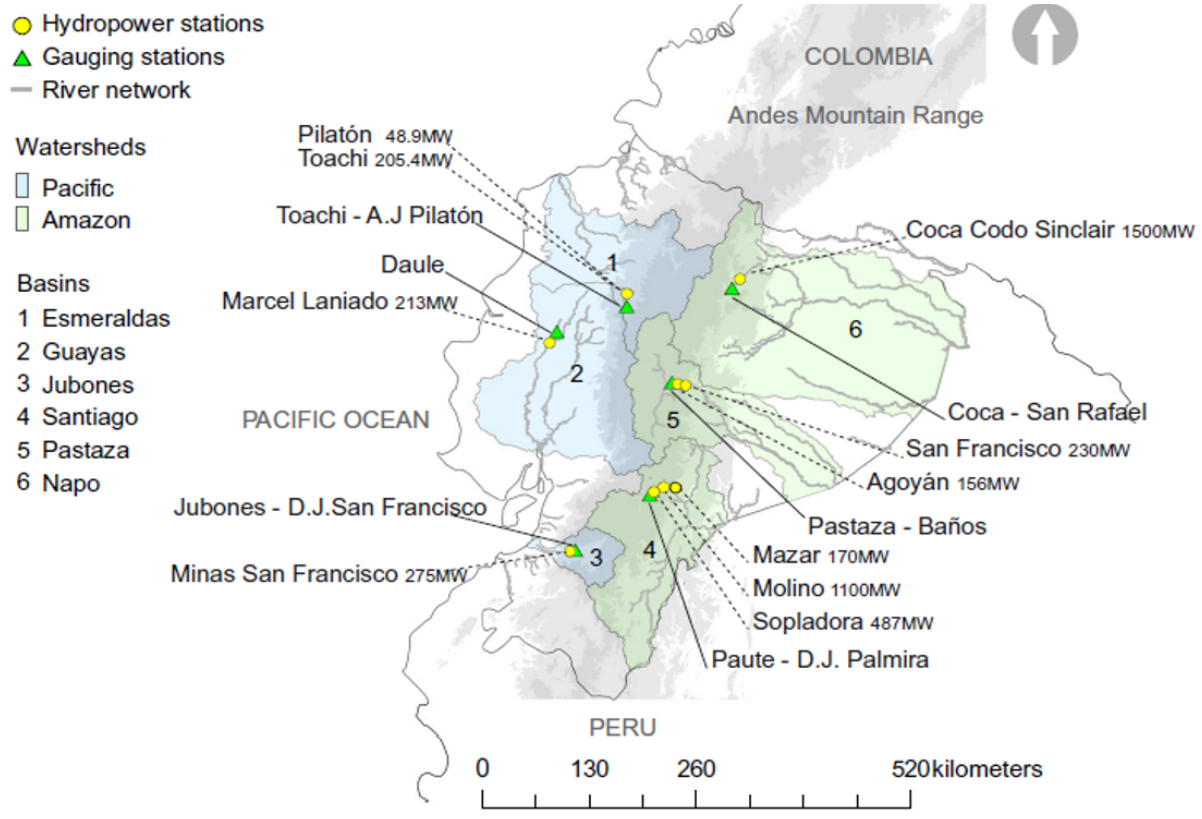

Figura 2. Principales cuencas y proyectos hidroeléctricos en Ecuador.
Fuente: Carvajal y col. (2017).

A continuación, se detalla la producción desde 1985 en Ecuador a manera de comparación entre energías renovables; en la Figura 5 se muestra una gran diferencia acumulada en el despliegue de la hidroenergía, lo que confirma un crecimiento lento y regular hasta el año 2000. El desarrollo comenzó a aumentar, luego en el 2008 se incorporaron gradualmente nuevos proyectos, y finalmente en el 2017 hubo alrededor de 20 TWh de producción de energía hidroeléctrica en comparación con 4 TWh en 1985 (MERNNR, 2018; Ritchie y Roser, 2020).

La Figura 5 muestra que la oferta hidroeléctrica en Ecuador aumentó de 4 TWh a 24 TWh en 35 años (1985 a 2020); también indica que otras energías renovables como la eólica y la solar han reducido el crecimiento, con casi ninguna relevancia de contribución a la red energética. Por lo tanto, este desarrollo hidroeléctrico representativo del Ecuador resulta pertinente para analizar los efectos y parámetros externos como el cambio climático. El país depende actualmente de muchos proyectos hidroeléctricos, y esta fuente es sensible a las variaciones climáticas (Zhong y col., 2019).

De acuerdo con la Primera Contribución Determinada a Nivel Nacional de Ecuador (PI-NDC) del Ministerio de Ambiente y Agua en el 2019, un análisis histórico de precipitación y temperatura promedio para el período 1960-2015 determinó variaciones esenciales; las lluvias aumentaron en la Costa en 33 %; en la Sierra en 13 %, y en la Amazonía se redujo 1 % de la precipitación. Además, hay un aumento de temperatura promedio de $0,8°$ (Ministerio de Medio Ambiente, Agua y Transición ecológica, 2019). En consecuencia, la hidroelectricidad depende de la disponibilidad de recursos naturales como la precipitación, que desempeña un papel fundamental en la escorrentía del flujo y el ciclo natural del agua (Bakken, Killingtveit y Alfredsen, 2017; Van Vliet y col., 2016).

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

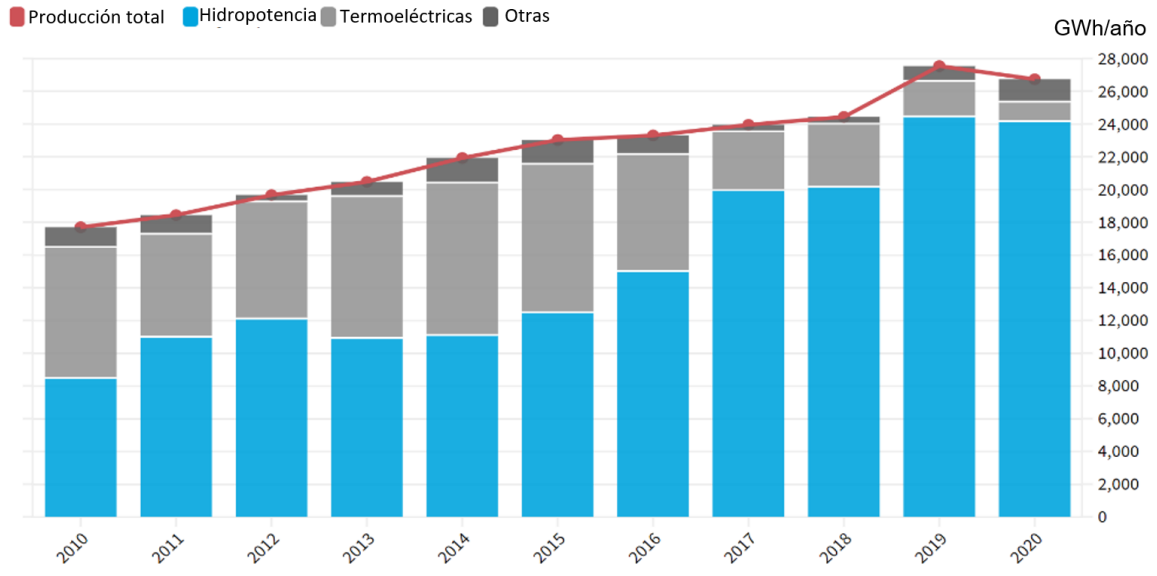

Figura 3. Producción energética Ecuador GWh / año.
Fuente: CELEC (2020).

De igual forma, resulta necesario mencionar que en Ecuador, al encontrarse en la mitad de la línea ecuatorial, existen diferencias en la precipitación entre el norte y sur, donde se registran sequías y subproducción hidroeléctrica, respectivamente, lo que ocasiona problemas a la hora de analizar su tendencia y proyección climática (Ponce-Jara y col., 2018).

Finalmente, antes de hablar de las proyecciones hidroeléctricas en Ecuador, es importante mencionar que para el año 2021 se habían instalado 5 107 MW de energía hidroeléctrica, también según la Comisión Regional de Integración Energética de Sudamérica, Ecuador tiene una capacidad hidroeléctrica factible de 23 120 MW, lo que representa una instalación del 22 % hasta el momento de esta renovable (Regional Energy Integration Commission of South America, 2021).

4.2 Proyecciones hidroeléctricas en Ecuador

Según el MERN de Ecuador en el Plan Maestro de Electricidad proyectado hasta 2027 se incorporarían 645 MW con 14 proyectos que proporcionarán una energía promedio anual de 3 491 GWh. De los 14 proyectos en construcción, 11 corresponden a proyectos hidroeléctricos con 407,5 MW, es decir, el 63 % de la planificación, dos proyectos termoeléctricos con una capacidad de 187 MW, y un proyecto eólico con una potencia de 50 MW, como se indica en la Tabla 2.

En la Tabla 2 se puede observar que en Ecuador el desarrollo de la energía hidroeléctrica seguirá siendo primordial. Además de los proyectos hidroeléctricos pequeños y medianos, los datos muestran una inversión pública y privada del 88 % y 12 %, respectivamente. Sin embargo, dos grandes proyectos hidroeléctricos buscan continuar con la estrategia de expansión hidráulica por su capacidad, estos son Santiago y Cardenillo, como se muestra en la Tabla 3.

Sin embargo, estas dos hidroeléctricas no resultan de interés debido a las cantidades representativas necesarias de inversión y su grado de avance solo en estudios; por lo que no constituyen plantas con la certeza de ejecución para incluirlas en la actual expansión energética. Sin embargo, con proyecciones a corto plazo, el MERN de Ecuador debe definir estos proyectos como prioritarios y el Estado debe licitar para atraer fondos internacionales, que pueden estar parcialmente constituidos por créditos de carbono, ya que son proyectos de fuentes renovables, que generalmente tienen 50 años de vida.

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

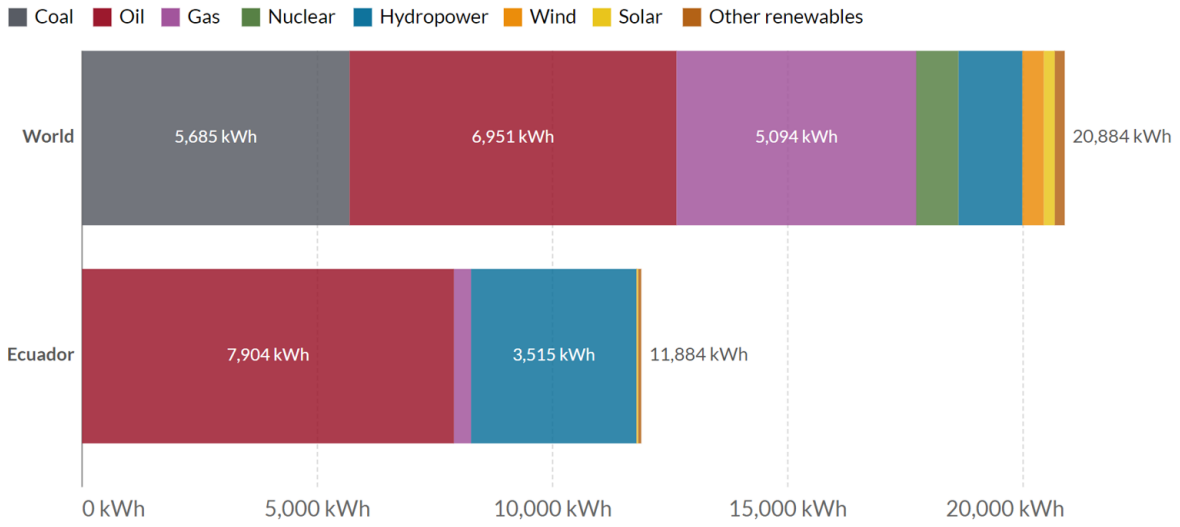

Figura 4. Consumo de energía primaria per cápita según fuente de 2019.
Fuente: (BP p.l.c., 2020).
Nota: En la figura, el término "oil" representa combustibles fósiles destinados a producir termoelectricidad.

Las proyecciones, el crecimiento de la población y el consumo requieren constantemente generación adicional de electricidad a pesar de las instalaciones hidroeléctricas actuales; los datos del Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables establecen la tendencia de crecimiento histórico anual del consumo de energía de Ecuador en 4,89%. Por lo tanto, es necesario pensar en el corto y mediano plazo en continuar implementando proyectos renovables, no solo hidroeléctricos.

En este contexto, a criterio del investigador, se proyectan tres tendencias de crecimiento hasta el 2030 basadas en el consumo real de Ecuador en el 2020, y tomando como base el incremento histórico anual del 4,9% del MERN. Además, el investigador aumentó un punto porcentual para las siguientes dos tendencias, en el caso medio 5,9%, y escenario alto 6,9% como tendencia conservadora de las necesidades energéticas para el país. Como se muestra en la Tabla 4, Ecuador necesitará para el año 2030 alrededor de 43 TWh, 47 TWh, o 52 TWh de energía, según los escenarios propuestos (bajo, medio, alto) respectivamente, lo que requerirá un amplio desarrollo renovable y no renovable. Como referencia, si se implementan más proyectos hidroeléctricos, se deben utilizar instrumentos como el Hydropower Sustainability Assessment Protocol (HSAP) que contiene conceptos y sugerencias para que los países que construyen estos proyectos a nivel mundial gestionen criterios de sostenibilidad (International Hydropower Association, 2018a).

Por otro lado, comparando las tendencias, según una investigación del papel a largo plazo de los sistemas hidroeléctricos hacia el cumplimiento de la Contribución Determinada a Nivel Nacional del Ecuador, la hidroenergía genera impactos mediante el uso de condiciones ambientales, relacionando los efectos debidos a la acumulación de agua como cambio en la calidad del agua, deforestación y variaciones subclimáticas. Bajo este análisis, Ecuador demuestra incertidumbre pues la investigación muestra que la energía suministrada por la hidroelectricidad variaría significativamente entre 53% a 81% para el año 2050, lo que produce que la meta ecuatoriana de la NDC se lograría sin la distribución de una estructura hidroeléctrica de tamaño importante. Además, las proyecciones del estudio muestran que de existir una disminución del 25% en la disponibilidad de energía hidroeléctrica se acumularán las emisiones de CO_2 por el uso de combustibles fósiles y se duplicarán (Carvajal y col., 2019). Asimismo, a largo plazo, las simulaciones determinan que los impactos cuantificados para 2071-2100 tienen una amplia gama de diferencia anual; la producción hidroeléctrica en Ecuador varía entre -55% y + 39% del promedio histórico (Carvajal y col., 2017).

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Tabla 2. Proyectos energéticos en construcción o proyectados en Ecuador.
Fuente: (Ministerio de Energía y Recursos No Renovables, 2019).

Proyecto	Tipo de inversión	Origen	Capacidad [MW]	Energía media [GWh/año]	Patrimonio
Toachi Pilaton	Público	Energía hidroeléctrica	254,4	1120	Santo Domingo
Machala Gas	Público	Termoeléctrico	110	690	El Oro
Machala Gas Tercera	Público	Termoeléctrico	77	510	El Oro
Minas de Huascachaca	Público	Viento	50	119	Loja
Quijos	Público	Energía hidroeléctrica	50	355	Napo
Piatua	Privado	Energía hidroeléctrica	30	210,5	Pastaza
Sabanilla	Privado	Energía hidroeléctrica	30	210,5	Zamora Chinchipe
Río Verde Chico	Privado	Energía hidroeléctrica	10	74,3	Tungurahua
Chalpi Grande	Público	Energía hidroeléctrica	7,59	36	Napo
Mazar - Dunas	Público	Energía hidroeléctrica	7,38	41,4	Cañar
Mazar San Antonio	Público	Energía hidroeléctrica	7,19	44,9	Cañar
San José de Minas	Privado	Energía hidroeléctrica	5,95	48	Pichincha
Chorrillos	Público	Energía hidroeléctrica	4	23,2	Zamora Chinchipe
Ulba	Privado	Energía hidroeléctrica	1,02	8,4	Tungurahua
Total			**644,5**	**3 490,6**	**-**

Nota: IRENA defines. Pequeños proyectos $\leq$ 10 MW de capacidad, medianos a 11 MW $\leq$ 300 MW, y grandes hasta 301 MW.

Asi mismo, se determinó que los aportes determinados a nivel nacional basados en la energía hidroeléctrica son altamente vulnerables a la aparición de un escenario de clima seco debido a las variaciones climáticas en la Amazonía. Además, dado el patrón de lluvias estacionales en Ecuador independientemente de la cantidad de energía hidroeléctrica instalada, el objetivo de la NDC requiere una cartera diversificada y no esencialmente de fuentes renovables (Carvajal y col., 2019; Guallpa, Célleri y Crespo, 2022). Ecuador debería trabajar una red energética más robusta en el largo plazo con una adecuada diversificación de las tecnologías de generación mediante políticas para aumentar las energías renovables no convencionales (solar, eólica, mareomotriz y geotérmica) (Carvajal y col., 2017). El Banco Interamericano de Desarrollo determina que en el futuro se proyecta la hidroelectricidad como fuente de apoyo, habilitando otras renovables (Alarcon, 2019).

Además, en una evaluación de ecosistemas realizada en Ecuador, Briones-Hidrovo, Uche y Martínez (2020) en un estudio de cinco proyectos hidroeléctricos instalados: Baba, Marcel Laniado, Alazán, Mazar- Dudas y San Antonio determinó que el mundo tiene como objetivo desarrollar energías renovables frente al colapso climático y ecológico. Sin embargo, existen problemas ambientales debido a la profunda interacción con las áreas inmediatas que mueven a las personas de las comunidades indígenas hacia un cambio en el estilo de vida (Briones-Hidrovo, Uche y Martínez, 2020; Hasan y Wyseure, 2018).

Parra (2020) explica que la energía hidroeléctrica en Ecuador es susceptible a las variaciones climáticas. Los estudios muestran que la capacidad hidroeléctrica podría mostrar una sensibilidad sustancial

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

a las diferencias en los patrones de precipitación. En Ecuador, esto podría cambiar los patrones de precipitación, especialmente en las regiones andinas del trópico alto. En los últimos años, la promoción de las centrales hidroeléctricas produjo una reducción de la quema de combustibles fósiles. A pesar de ello, considerando los posibles impactos del cambio climático en esta renovable, como ocurrió en 2009, la energía hidroeléctrica se vio afectada por las condiciones climáticas secas (Cabrera y col., 2021; Parra, 2020).

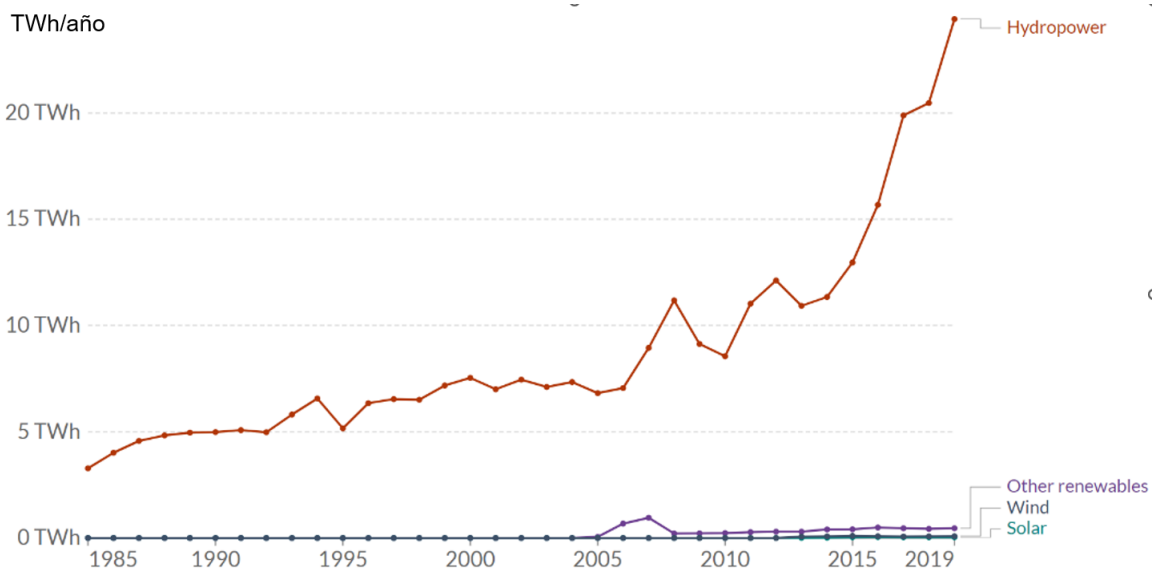

Figura 5. Producción de energía renovable en el 2019 en Ecuador.
Fuente: (Ritchie y Roser, 2020).

Finalmente, otro estudio determina la capacidad hasta el año 2030 de los cinco proyectos hidroeléctricos importantes del Ecuador (Coca Codo Sinclair, Manduriacu, Minas San Francisco, Toachi Pilaton y Delsintagua). Se proyectó que estas plantas tenían una capacidad inicial de 2 275 MW, sin embargo, la investigación concluye que del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático tres escenarios (A1, B1 y B2) muestran importantes disminuciones de capacidad. Por ejemplo, la línea llamada A1 tiene una reducción hasta 1 839 MW hasta 2050; el escenario B1 se proyecta hasta 1 995 MW; y el escenario conservador B2 hasta 2 104 MW. Concluyendo que en los escenarios A1, B1 y B2 la capacidad de estas plantas disminuirá en 19 %, 12 % y 8 %, respectivamente (Naranjo-Silva y Quimbita, 2022).

De esta forma y a modo de resumir las proyecciones, se encontró que el valor de los servicios ecosistémicos disminuyó con la estructura de los proyectos hidroeléctricos; la explotación de fuentes renovables implica la degradación y supresión de los servicios ecológicos, lo que reduce la capacidad del ecosistema para proveer todas sus funciones cuantitativa y cualitativamente, planteando un tema preocupante debido a que la hidroenergía no debe ser promocionada como fuente de energía sostenible (Briones-Hidrovo, Uche y Martínez, 2017; Briones-Hidrovo, Uche y Martínez, 2019). Además, los estudios mencionan que la energía hidroeléctrica depende de una ubicación y capacidad estratégicas, pero tiene algunos problemas sociales, ambientales y culturales, ya que desequilibra la vida acuática antes y después del embalse, fragmenta y transforma los ríos, destruye ecosistemas, reduce los recursos pesqueros y a veces utiliza territorios de comunidades lejanas, obligando a esas personas a reubicarse (Voegeli, Hediger y Romerio, 2019; Zarfl y col., 2019).

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Tabla 3. Proyectos hidroeléctricos de más de 500 MW en Ecuador.

Proyecto	Fase de proyecto	Capacidad [MW]	Energía media [GWh/año]	Patrimonio	Ubicación específica
Santiago	Viabilidad y diseño definitivo	2400	14 613	Morona Santiago	Twinza
Cardenillo	Viabilidad y diseño definitivo	596	3409	Morona Santiago	Méndez
Total		2996	18 022	-	-

5 Discusión

Para lograr la sostenibilidad energética mundial, la energía renovable debe sustituir a la quema de combustibles fósiles (Camayo y col., 2021; García-Parra y col., 2022). Sin embargo, a nivel mundial, la producción hidroeléctrica presenta una visión amplia de las ventajas, y poco se explica sobre las desventajas y problemas, por lo que estudios científicos muestran que la generación hidroeléctrica tiene varias implicaciones en los ecosistemas debido al desarrollo de la gran infraestructura (Naranjo-Silva y J., 2021).

En Ecuador se han desarrollado grandes infraestructuras hidroeléctricas durante 15 años debido a la disponibilidad de agua, pero ¿hasta qué punto es sostenible este uso excesivo del agua? De acuerdo con la IHA, Ecuador ocupó el tercer lugar en el ranking mundial de naciones que agregaron nuevos proyectos de hidroelectricidad el año pasado (International Hydropower Association, 2018b).

Por otra parte, se llevaron a cabo estudios sobre los efectos climáticos y el desarrollo violento de la energía hidroeléctrica; por ejemplo, Lehner, Czisch y Vassolo (2005) estima que el potencial bruto de energía hidroeléctrica disminuirá aproximadamente entre un 6 % y un 12 % para la década de 2070 en Europa. Las estimaciones en regiones vulnerables o modificadas establecen que, a nivel mundial, se necesita un billón de dólares para compensar el deterioro de los últimos 18 años de generación hidroeléctrica asociada con el cambio climático (Turner, Kim y Edmonds, 2017).

Según Hofstra y col. (2019), el cambio climático plantea una amenaza global para la producción hidroeléctrica y termoeléctrica. A través de la modelación hidrológica acoplada se evalúan opciones para la adaptación sostenible del agua y la energía; para el escenario 2040-2069, el estudio estima una reducción del 61 %- 74 % en la capacidad utilizable de los proyectos hidroeléctricos y termoeléctricos (Hofstra y col., 2019).

Un análisis en China indica que la hidroenergía es sensible y vulnerable a las fluctuaciones climáticas, siendo la temperatura y la lluvia los factores más importantes; por lo tanto, los fenómenos meteorológicos extremos como la lluvia, las olas de calor, las inundaciones y la sequía imponen desafíos para el desarrollo hidroeléctrico del país, con una mayor capacidad global instalada de 356 GW (año 2020) (Fan y col., 2020).

Los estudios llevados a cabo en India concluyen que todas las cuencas hidrológicas experimentan cambios sustanciales en la precipitación y la temperatura que afectan la disponibilidad de agua para la producción de la energía hidroeléctrica, y se observa un clima más cálido y húmedo en el futuro; por lo tanto, se calcula que la temperatura media anual aumentará entre $18 \pm 14,6\,\%$ hasta el final del siglo (Ali y col., 2018).

Los resultados de Ecuador mostraron una rápida expansión de la hidroenergía en los últimos años, y hoy en día es la principal fuente de energía, y el escenario medio conservador para 2030 determina una necesidad de 47 TWh para el país. Sin embargo, Escribano (2013), en un análisis de políticas energéticas ecuatorianas, menciona que es evidente que la expansión de la hidroelectricidad enfrenta problemas regulatorios, financieros y sociales, subrayando la seria importancia de realizar un análisis exhaustivo de la red energética relacionada con el desarrollo del país versus la conservación ambiental.

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Tabla 4. Escenarios de demanda energética en Ecuador.
Fuente: (Ministerio de Energía y Recursos No Renovables, 2019).

Año	Baja [GWh]	Medio [GWh]	Alta [GWh]
2020 (Base)	26 727	26 727	26 727
2021	28 037	28 304	28 571
2022	29 410	29 974	30 543
2023	30 852	31 742	32 650
2024	32 363	33 615	34 903
2025	33 949	35 598	37 311
2026	35 613	37 699	39 886
2027	37 358	39 923	42 638
2028	39 188	42 278	45 580
2029	41 108	44 773	48 725
2030	43 123	47 414	52 087
Porcentaje de variación 2020-2027	4,90 %	5,90 %	6,90 %

Además, como se menciona en la sección de proyecciones hidroeléctricas en Ecuador, existe un 22 % de capacidad instalada factible con datos de 2021, pero debido a las diferencias de precipitación entre el norte y sur de Ecuador, donde se registran sequías y subproducción hidroeléctrica, respectivamente, es técnicamente complicado materializar proyectos adicionales que requieren análisis robustos además de las constantes variaciones climáticas. Por lo tanto, lograr la capacidad hidroeléctrica total factible dependería de los recursos, lo que significa una inversión que el país no tiene, porque en este momento (corte de diciembre de 2022), la deuda pública es aproximadamente de 73 114 millones de dólares (Llerena-Montoya y col., 2021). Además de los costos económicos como obstáculo para nuevas inversiones en sistemas hidroeléctricos, las áreas técnicas y administrativas por la falta de avance de los estudios finales de factibilidad e ingeniería no permiten el desarrollo específico de este tipo de estructuras que finalmente también tienen repercusiones ambientales en ecosistemas vírgenes que se encuentran en lugares alejados de las principales ciudades.

En un estudio de escenarios energéticos en Ecuador, Villamar2019, Villamar2021 muestra que las influencias del cambio climático estorbarían la capacidad hidroeléctrica para contribuir con el cumplimiento de los objetivos como país para disminuir los gases de efecto invernadero que causan el calentamiento global. Aunque la hidroenergía se presenta de manera renovable, muestra impactos ambientales, haciendo de este un subsector de especial consideración para su desarrollo (Chiang y col., 2013). En general, la tendencia mundial es desarrollar más proyectos hidroeléctricos para mitigar la contaminación de los gases de efecto invernadero procedentes de fuentes de generación de combustibles fósiles. Sin embargo, hoy en día, en Ecuador, hay algunos impactos de esta fuente renovable. Sin embargo, hay que considerar que el crecimiento y el suministro de energía requieren un análisis específico de la infraestructura hidroeléctrica. Se espera que los cambios sustanciales en la precipitación y la temperatura a nivel mundial afecten la disponibilidad de agua para la generación hidroeléctrica, haciendo de Ecuador un país vulnerable (Ali y col., 2015; Mousavi, Ahmadizadeh y Marofi, 2018).

Finalmente, este manuscrito presenta un resumen general de la energía hidroeléctrica en Ecuador, sin embargo, sigue siendo solo un ejemplo de un pequeño país en América Latina con una capacidad hídrica sustancial. Para conocer en profundidad las repercusiones de la hidroelectricidad, especialmente a gran escala, se debe obtener más información de países como Brasil, China y Estados Unidos, donde la expansión hidroeléctrica es mayor en cuanto a la capacidad instalada.

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

6 Conclusiones

La energía hidroeléctrica en el Ecuador ha crecido excesivamente en los últimos años; en 1985, el país generó 4.000 GWh; en 2010 Ecuador aportó alrededor de 8 000 GWh. Para 2020, suministró 24.000 GWh, lo que representó un aumento relativo para 2010-2020 en torno al + 300 %.

Con base en la estimación del Ministerio de Ambiente y Agua de los cambios de temperatura y precipitación, las proyecciones realizadas por la red de energía y las plantas hidroeléctricas del Ecuador están sujetas a incertidumbre. Además, para 2030, el país requerirá el escenario de baja energía, media y alta en alrededor de 43 123 GWh, 47 414 GWh y 52 087 GWh, respectivamente, y la hidroelectricidad seguirá siendo una fuente renovable esencial para el país.

Según las proyecciones para Ecuador hasta 2030, se estableció como escenario principal un crecimiento medio conservador promedio del 5,9 % anual de consumo de energía. Pero, independientemente del porcentaje de capacidad hidroeléctrica instalada, en el futuro se necesitará una expansión no necesariamente renovable, lo que podría causar un notorio desequilibrio ambiental.

Ecuador es un ejemplo global de gestión de una red energética con más del 80 % de energía hidroeléctrica para el año 2020. Por lo tanto, este desarrollo renovable relaciona el hallazgo de fragilidad con los ecosistemas que rodean los proyectos hidroeléctricos, generando un nuevo problema aparte del efecto del cambio climático.

Las futuras investigaciones podrían analizar la interacción de la hidroenergía con los ecosistemas instalados con modelos de disponibilidad de agua y cambio ambiental. Asimismo, se recomienda desarrollar y aplicar criterios de sostenibilidad a través de una metodología de evaluación climática, económica, ambiental y social para contrarrestar los efectos producidos por los proyectos hidroeléctricos.

Agradecimientos

Me gustaría agradecer a Javier Álvarez del Castillo, Director de la Cátedra UNESCO de Sostenibilidad en Terrassa, España, profesor que me orientó en aspectos de investigación como parte de mi Tesis Doctoral que está relacionada con este manuscrito.

Contribución de los autores

SNS; Conceptualización, tratamiento de datos, análisis formal, supervisión, validación, investigación, escritura, edición, redacción del borrador original y de la versión final del manuscrito.

Referencias

Alarcon, A. (2019). *The hydroelectric plants in Latin America, where are we? and where are we going?*

Ali, S. y col. (2015). «Twenty first century climatic and hydrological changes over Upper Indus Basin of Himalayan region of Pakistan». En: *Environmental Research Letters* 10.1, 014007. Online:https://n9.cl/hrz5i.

Ali, S. y col. (2018). «Projected increase in hydropower production in India under climate change». En: *Scientific reports* 8.1, 12450. Online:https://n9.cl/pig3o.

Álvarez-Chiriboga, D. (2020). «Modelo de predicción de la producción de energía de la Central Hidroeléctrica Coca Codo Sinclair, basado en técnicas de aprendizaje computacional». Tesis de mtría. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

BP p.l.c. (2020). *Statistical Review of World Energy. 69th edition. Online:https://bit.ly/48x0Uv0*. Inf. téc. BP p.l.c.

Bakken, T., Å. Killingtveit y K. Alfredsen (2017). «The water footprint of hydropower production—state of the art and methodological challenges». En: *Global Challenges* 1.5, 1600018. Online:https://n9.cl/vgh0q.

Briones-Hidrovo, A., J. Uche y A. Martínez (2017). «Accounting for GHG net reservoir emissions of hydropower in Ecuador». En: *Renewable Energy* 112, 209-221. Online:https://n9.cl/6cnos.

— (2019). «Estimating the hidden ecological costs of hydropower through an ecosystem services balance: A case study from Ecuador». En: *Journal of cleaner production* 233, 33-42. Online:https://n9.cl/abt1u.

— (2020). «Determining the net environmental performance of hydropower: A new methodological approach by combining life cycle and ecosystem services assessment». En: *Science of the Total Environment* 712, 136369. Online:https://n9.cl/o0pdt.

CELEC (2020). *CELEC EP genera y transmite más del 90 por ciento de la energía eléctrica limpia que consume el país y exporta a los países vecinos*.

CISPDR y SENAGUA (2016). *Plan nacional de la gestión integrada e integral de los recursos hídricos de las cuencas y microcuencas hidrográficas de Ecuador*. CISPDR.

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Cabrera, S. y col. (2021). «Variations in benthic macroinvertebrate communities and biological quality in the Aguarico and Coca river basins in the Ecuadorian Amazon». En: *Water* 13.12, 1692. Online:https://n9.cl/gkzqz.

Camayo, B. y col. (2021). «Autonomous solar thermal system design for indirect dehydration of Aguaymanto (Physalis Peruviana L.), Junín». En: *La Granja* 33.1, 114-123. Online:https://n9.cl/v6zka.

Carvajal, P. y col. (2017). «Assessing uncertainty of climate change impacts on long-term hydropower generation using the CMIP5 ensemble—the case of Ecuador». En: *Climatic Change* 144, 611-624. Online:https://n9.cl/ow3ag.

Carvajal, P. y col. (2019). «Large hydropower, decarbonisation and climate change uncertainty: Modelling power sector pathways for Ecuador». En: *Energy Strategy Reviews* 23, 86-99. Online:https://n9.cl/ul5pv.

Chiang, J. y col. (2013). «Potential impact of climate change on hydropower generation in southern Taiwan». En: *Energy Procedia* 40, 34-37. Online:https://n9.cl/lc2yd.

Escribano, G. (2013). «Ecuador's energy policy mix: Development versus conservation and nationalism with Chinese loans». En: *Energy Policy* 57, 152-159. Online:https://n9.cl/yvgbtp.

Fan, J. y col. (2020). «Impacts of climate change on hydropower generation in China». En: *Mathematics and Computers in Simulation* 167, 4-18. Online:https://n9.cl/3hm24.

García-Parra, M. y col. (2022). «Los Objetivos de Desarrollo Sostenible en América: Panorama». En: *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida* 36.2, 46-59. Online:https://bit.ly/4aUrvUx.

Guallpa, M., R. Célleri y P. Crespo (2022). «Efecto del coeficiente teórico de descarga de vertederos sobre la medición de caudales en pequeños ríos Andinos». En: *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida* 36.2, 75-87. Online:https://bit.ly/4b3NJn5.

Guilcatoma-Aimacaña, V. (2010). «Inventario de las especies vegetales nativas del Cerro Teligote cantón Pelileo, provincia del Tungurahua desde los 3200 hasta los 3420 msnm». Tesis de mtría. Universidad Técnica de Ambato.

Hasan, M. y G. Wyseure (2018). «Impact of climate change on hydropower generation in Rio Jubones Basin, Ecuador». En: *Water Science and Engineering* 11.2, 157-166. Online:https://n9.cl/z7o9x.

Hidalgo, D. y col. (2024). «Retroceso del glaciar del Carihuairazo y sus implicaciones en la comunidad de Cunucyacu». En: *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida* 39.1, [Acceso Temprano]. Online:http://doi.org/10.17163/lgr.n39.2024.06.

Hofstra, N. y col. (2019). «Editorial overview: Water quality: A new challenge for global scale model development and application». En: *Current opinion in environmental sustainability* 36, A1-A5. Online:https://n9.cl/37pxz.

ICOLD (2019). *General Synthesis of World register of dams*.

IRENA (2020). «Renewable Energy Statistics 2020». En: International Renewable Energy Agency. Cap. Renewable hydropower (including mixed plants), págs. 16-21.

— (2021). *Renewable Power Generation Costs in 2020*. International Renewable Energy Agency.

International Hydropower Association (2018a). *Hydropower Sustainability Assessment Protocol (Vol. 56, Issue 3)*.

— (2018b). *Hydropower Sustainability Guidelines on Good International Industry Practice*.

— (2021). *Hydropower Status Report 2021: Sector trends and insights*.

International Renewable Energy Agency (2020). *Renewable Energy Capacity Highlights 2019. Irena, 00(March 2020), 1–3*.

Jin, Y., H. Andersson y S. Zhang (2016). «Air pollution control policies in China: a retrospective and prospects». En: *International journal of environmental research and public health* 13.12, 1219. Online:https://n9.cl/b4fh9.

Killingtveit, Å. (2018). «Managing Global Warming: An Interface of Technology and Human Issues». En: International Renewable Energy Agency. Cap. Hydropower, págs. 265-315.

Lehner, B., G. Czisch y S. Vassolo (2005). «The impact of global change on the hydropower potential of Europe: a model-based analysis». En: *Energy Policy* 33.7, 839-855. Online:https://n9.cl/q63q3.

Llamosas, C. y B.K. Sovacool (2021). «The future of hydropower? A systematic review of the drivers, benefits and governance dynamics of transboundary dams». En: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 137.0327, 110-124. Online:https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110495.

Llerena-Montoya, S. y col. (2021). «Multitemporal analysis of land use and land cover within an oil block in the Ecuadorian Amazon». En: *ISPRS International Journal of Geo-Information* 10.3, 191. Online:https://n9.cl/arbzn.

Lu, S. y col. (2020). «A review of the impact of hydropower reservoirs on global climate change». En: *Science of the Total Environment* 711, 134996. Online:https://n9.cl/bs7su.

MERNNR (2018). *National Energy Efficiency Plan. 2018. Online:https://bit.ly/48yZj7Q*. Inf. téc. BP p.l.c.

Mena-Vasconez, P. (2018). «Biodiversity Ecuador». p. 16.

Ministerio de Energía y Recursos No Renovables (2019). *Plan Maestro de Electricidad*.

Ministerio de Medio Ambiente, Agua y Transición ecológica (2019). *First Contribution Determined at the National Level to the Paris Agreement under the United Nations Framework Convention on Climate Change*.

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Mousavi, Roya Sadat, Mojtaba Ahmadizadeh y Safar Marofi (2018). «A multi-GCM assessment of the climate change impact on the hydrology and hydropower potential of a semi-arid basin (A case study of the Dez Dam Basin, Iran)». En: *Water* 10.10, pág. 1458.

Naranjo-Silva, S. y Álvarez. J. (2021). «Hydropower: Projections in a changing climate and impacts by thisçlean"source». En: *CienciAmérica* 10.2, 32-45. Online:https://n9.cl/arwut.

Naranjo Silva, S., D. Punina y J. Morales (2021). «Energía solar en paradas de bus una aplicación moderna y vanguardista». En: *Revista InGenio* 4.1, 58-68. Online:https://n9.cl/0t8k5.

Naranjo-Silva, S. y O. Quimbita (2022). «Hydropower and climate change concerning to the implementation of the First National Determined Contribution in Ecuador». En: *Revista Iberoamericana Ambiente & Sustentabilidad* 5, 268. Online:https://n9.cl/9e0a3.

Naranjo Silva, Sebastian y J. Álvarez (2021). «An approach of the hydropower: Advantages and impacts. A review». En: *Journal of Energy Research and Reviews* 8.1, 10-20. Online:https://n9.cl/dfnky.

Parra, R. (2020). «Contribution of Non-renewable Sources for Limiting the Electrical CO2 emission factor in Ecuador». En: *WIT Trans. Ecol. Environ* 244, 65-77. Online:https://n9.cl/xohgi.

Ponce-Jara, M. y col. (2018). «Electricity sector in Ecuador: An overview of the 2007–2017 decade». En: *Energy Policy* 113, 513-522. Online:https://n9.cl/5nmoyw.

Purcell, T. y E. Martínez (2018). «Post-neoliberal energy modernity and the political economy of the landlord state in Ecuador». En: *Energy Research & Social Science* 41, 12-21. Online:https://n9.cl/pw5afo.

Regional Energy Integration Commission of South America (2021). *Energy publications of South America*.

Ritchie, H. y M. Roser (2020). *Renewable Energy - Our world in data*.

Schaefli, B. (2015). «Projecting hydropower production under future climates: a guide for decision-makers and modelers to interpret and design climate change impact assessments». En: *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water* 2.4, 271-289. Online:https://n9.cl/dl2oi.

Tang, W., Z. Li e Y. Tu (2018). «Sustainability risk evaluation for large-scale hydropower projects with hybrid uncertainty». En: *Sustainability* 10.1, 138. Online:https://n9.cl/r2qiz.

Teräväinen, T. (2019). «Negotiating water and technology—Competing expectations and confronting knowledges in the case of the Coca Codo Sinclair in Ecuador». En: *Water* 11.3, 411. Online:https://n9.cl/gmdeg.

Turner S.and Hejazi, M., L. Kim S.and Clarke y J. Edmonds (2017). «Climate impacts on hydropower and consequences for global electricity supply investment needs». En: *Energy* 141, 2081-2090. Online:https://n9.cl/hvuq4.

Vaca-Jiménez, S., P. Gerbens y S. Nonhebel (2020). «The monthly dynamics of blue water footprints and electricity generation of four types of hydropower plants in Ecuador». En: *Science of The Total Environment* 713, 136579. Online:https://n9.cl/cu5bj.

Van Vliet, M. y col. (2016). «Power-generation system vulnerability and adaptation to changes in climate and water resources». En: *Nature Climate Change* 6.4, 375-380. Online:https://n9.cl/4387x.

Voegeli, G., W. Hediger y F. Romerio (2019). «Sustainability assessment of hydropower: Using causal diagram to seize the importance of impact pathways». En: *Environmental Impact Assessment Review* 77, 69-84. Online:https://n9.cl/bk2hd.

Zarfl, C. y col. (2019). «Future large hydropower dams impact global freshwater megafauna». En: *Scientific reports* 9.1, 18531. Online:https://n9.cl/aml8v.

Zhong, R. y col. (2019). «Hydropower change of the water tower of Asia in 21st century: A case of the Lancang River hydropower base, upper Mekong». En: *Energy* 179, 685-696. Online:https://n9.cl/400jc.

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

La Granja:
Revista de
Ciencias de la Vida

pISSN:1390-3799; eISSN:1390-8596

http://doi.org/10.17163/lgr.n39.2024.05

Número Especial/ Special Issue

Desarrollo Sostenible

CC BY NC SA

Efectos de las Regulaciones Medioambientales en la Eco-innovación y el Rendimiento Sustentable en la Industria Automotriz Mexicana

Environmental Regulations in Eco-innovation and Sustainable Performance in Mexican Automotive Industry

Gonzalo Maldonado-Guzmán*[1], Víctor Manuel Molina-Morejón[2], y Raymundo Juárez-del Toro[3]

[1]*Departamento de Mercadotecnia, Universidad Autónoma de Aguascalientes. Código Postal 20131, Aguascalientes, México.*
[2]*Facultad de Contaduría y Administración, Universidad Autónoma de Coahuila Unidad Torreón, Código Postal 27269, Torreón, México.*
[3]*Facultad de Contaduría y Administración, Universidad Autónoma de Coahuila Unidad Torreón, Código Postal 27269, Torreón, México.*

*Autor para correspondencia: gonzalo.maldonado@edu.uaa.mx

Manuscrito recibido el 7 de junio de 2023. Aceptado, tras revisión, el 7 de noviembre de 2023. Publicado el 1 de marzo de 2024.

Resumen

En la literatura se ha aportado evidencia que establece que el cumplimiento de las regulaciones medioambientales propicia la adopción e implementación de actividades de eco-innovación en las empresas manufactureras, ya que a través de este tipo de actividades no sólo se reducen los costos asociados a las descargas de contaminantes, sino también se incrementa el nivel del rendimiento sustentable de las empresas. Sin embargo, poco se sabe de la relación existente entre las regulaciones medioambientales, la eco-innovación y el rendimiento sustentable, ya que son pocos los estudios publicados en la literatura que se han orientado en su análisis, por lo cual este estudio tiene como objetivo llenar este vacío existente, y generar nuevo conocimiento de la relación entre estos tres constructos a través de una extensa revisión de la literatura. Asimismo, se distribuyó un cuestionario a una muestra de 460 empresas manufactureras de México, analizando los datos mediante el análisis factorial confirmatorio y los modelos de ecuaciones estructurales basados en la covarianza. Los resultados obtenidos sugieren que las regulaciones medioambientales tienen efectos positivos en la eco-innovación, y la eco-innovación tiene efectos positivos en el rendimiento sustentable de las empresas manufactureras de la industria automotriz. Bajo este contexto, los resultados obtenidos permitieron concluir que el cumplimiento de las regulaciones medioambientales establecidas por la administración pública, por parte de las empresas manufactureras de la industria automotriz, mejoran tanto las actividades de eco-innovación como el rendimiento sustentable de las organizaciones.

Palabras clave: Medioambiente, regulación, regulación medioambiental, innovación, eco-innovación, rendimiento sustentable, empresas manufactureras, industria automotriz.

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Abstract

In the literature, evidence has been provided that establishes that compliance with environmental regulations promotes the adoption and implementation of eco-innovation activities in manufacturing firms, since through this type of activities not only are the costs associated with the discharges of pollutants, but also increases the level of sustainable performance of companies. However, little is known about the relationship between environmental regulations, eco-innovation, and sustainable performance, since there are few studies published in the literature that have focused on their analysis, so this study aims to fill this existing gap, and generate new knowledge of the relationship between these three constructs through an extensive review of the literature. Likewise, a questionnaire was distributed to a sample of 460 manufacturing firms in Mexico, analyzing the data through confirmatory factor analysis and structural equation models based on covariance. The results obtained suggest that environmental regulations have positive effects on eco-innovation, and eco-innovation has positive effects on sustainable performance of manufacturing firms in the automotive industry. In this context, the results obtained allowed us to conclude that compliance with environmental regulations established by the public administration, by manufacturing firms in the automotive industry, improve both eco-innovation activities and sustainable performance of organizations.

Keywords: Environmental, regulation, environmental regulation, innovation, eco-innovation, sustainable performance, manufacturing firms, automotive industry.

Forma sugerida de citar: Maldonado-Guzmán, G., Molina-Morejón, V. y Juárez-del Toro, R. (2024). Efectos de las Regulaciones Medioambientales en la Eco-innovación y el Rendimiento Sustentable en la Industria Automotriz Mexicana. La Granja: Revista de Ciencias de la Vida. Vol. 39(1):78-91. http://doi.org/10.17163/lgr.n39.2024.05.

IDs Orcid:

Gonzalo Maldonado-Guzmán: https://orcid.org/0000-0001-8814-6415
Víctor Manuel Molina-Morejón: https://orcid.org/0000-0001-9124-0840
Raymundo Juárez-del Toro: https://orcid.org/0000-0001-5500-4066

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

1 Introducción

Los problemas ambientales se han convertido en un tema de gran interés a nivel global y de debate público en la literatura en los últimos años (Geng y He, 2021), especialmente porque el desarrollo de la sociedad no tiene que depender del agotamiento de los recursos naturales (Almeida y Wasim, 2023). En esta perspectiva, Emina (2021) consideró que el desarrollo económico de los países no solo debe estar sujeto a satisfacer las necesidades del presente, sino también a garantizar las necesidades de las generaciones futuras. Guo y col. (2020) recomiendan el uso de una combinación de políticas medioambientales y de innovación que permitan el crecimiento económico y empresarial a largo plazo. La ecoinnovación (EI) se perfila en la literatura como una de las alternativas que tienen las empresas para mejorar y reducir los efectos negativos que generan en el ambiente (Cai y Li, 2018), y puede ayudar a las empresas a mejorar el desempeño sostenible (DS) (García-Parra y col., 2022; Almeida y Wasim, 2023).

Además, diversos estudios han sugerido que la EI puede considerarse una solución alternativa a los problemas ambientales a nivel mundial (por ejemplo; Afshari, Searcy y Jaber (2020), García-Granero, Piedra y Galdeano (2020), Han y Chen (2021) y Arranz, Arguello y Arroyabe (2021)), en particular porque cuando las empresas manufactureras adoptan innovaciones respetuosas con el medio ambiente se reducen los efectos negativos de la contaminación ambiental (García-Granero, Piedra y Galdeano, 2020; Arranz, Arguello y Arroyabe, 2021). De igual forma, Bitencourt y col. (2020) sugirieron que las empresas que priorizan el cuidado del medio ambiente en sus políticas pueden obtener un mayor crecimiento económico a largo plazo, razón por la cual deberían prestar más atención a los aspectos ambientales y de sostenibilidad (Muhammad, Long y Salman, 2020).

En este contexto, la EI es una de las estrategias empresariales más eficaces para proteger el medio ambiente junto con la DS (Porter y van der Linde, 1995), y desempeña un papel fundamental en el crecimiento económico de empresas y países (Yang y Yang, 2015). Por lo tanto, algunos gobiernos están generando una serie de regulaciones ambientales (RA) para promover que las empresas ambientales adopten la EI (Yuan, Ren y Chen, 2017; Yuan y Xiang, 2018). Sin embargo, los resultados obtenidos de los estudios que relacionan la RA, EI y DS pueden ser considerados como no concluyentes y abiertos a debate (Dewick, Maytorena y Winch, 2019), es por ello que este estudio contribuye a la literatura de la EI con la generación de nuevos conocimientos, además de que complementa otros trabajos publicados (You, Zhang y Yuan, 2019). Por lo tanto, este trabajo aborda la siguiente pregunta de investigación: *¿Cuál es la relación entre RA, EI y DS en la industria automotriz?*

2 Materiales y Métodos

2.1 Normativa ambiental y ecoinnovación

Para reducir los impactos negativos sobre el medio ambiente y promover el desarrollo económico sostenible entre las empresas manufactureras, la administración pública interviene cada vez más a través del RA, para estimular a las empresas a adoptar medidas que mejoren el medio ambiente y la sostenibilidad (Xie y col., 2023), especialmente porque la RA es uno de los mejores instrumentos de política ambiental (Wang y Zhang, 2022). Además, la RA también puede motivar a las empresas a adoptar la EI, en particular las empresas manufactureras altamente contaminantes, como la industria automotriz, en los países de economías emergentes, donde la RA es generalmente muy baja (Wang, 2023), y se requiere la aplicación de la RA para mejorar las capacidades de la EI de las organizaciones (Xu, Zheng y Liu, 2020).

Recientemente varios estudios han explorado la relación entre la RA y la EI (por ejemplo; Liao y Tsai (2019), Wang, Font y Liu (2020), Frigon, Doloreux y Shearmur (2020) y Han y Chen (2021)), especialmente desde la implicación de la administración pública en la restricción de las regulaciones impuestas a las empresas y organizaciones para salvaguardar los ecosistemas (Sanni, 2018). Frigon, Doloreux y Shearmur (2020) y consideraron que la administración pública debería ser más rigurosa con las políticas ambientales y obligar a las empresas manufactureras a adoptar la EI para generar industrias libres de contaminación. En un estudio publicado recientemente, Han y Chen (2021) encontraron que las políticas de emergencias implementadas por la administración pública en Myanmar tuvieron un impacto positivo significativo en la EI de las empre-

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

sas manufactureras.

Asimismo, la administración pública está generando RA cada vez más rigurosas, y está ejerciendo presión para que las empresas manufactureras cumplan con las cuatro RA esenciales: (1) regulación de emisiones de contaminantes al medio ambiente, (2) impuesto por descarga de contaminantes, (3) uso de energía renovable y, (4) inversiones de plantas en nuevos proyectos de mejora ambiental local (Xie, Yuan y Huang, 2017). Además, las administraciones públicas están promoviendo la adopción y la ejecución de las diferentes actividades relacionadas con la EI en todas las empresas de la industria manufacturera, con el fin de reducir significativamente tanto el consumo de energía y recursos como los niveles de contaminación y la generación de CO_2 (Guo, Qu y Tseng, 2017; Liao, 2018). En este sentido, la EI es considerada hoy en día no solo como una de las mejores estrategias que ayuda a las empresas manufactureras a cumplir con la RA, sino también a generar una mayor DS (Shu y col., 2016; Wakeford y col., 2017).

Además, la EI inducida por el estricto cumplimiento de las exigencias ambientales no se limita únicamente a la innovación o al avance tecnológico de las empresas manufactureras, sino que también debe incluir la optimización de procesos, el diseño y la producción de productos y la aplicación de nuevos métodos de gestión y distribución de productos (Porter y van der Linde, 1995). Sin embargo, la mayoría de los estudios se han centrado en los efectos de la RA sobre la innovación tecnológica de las empresas manufactureras (Hojnik y Ruzzier, 2016; Costa-Campi, García y Martínez, 2017; Wakeford y col., 2017), y relativamente pocos estudios se han orientado en la RA sobre la EI de las empresas manufactureras (You, Zhang y Yuan, 2019). La RA puede promover la adopción de la EI entre las empresas manufactureras, a través de la aplicación de tres medidas elementales: prevención de la contaminación ambiental, gestión de productos ecológicos y desarrollo sostenible (You, Zhang y Yuan, 2019).

En este contexto, la RA desempeña un rol fundamental en el estímulo y la promoción de las empresas manufactureras, incluidas las que conforman la industria del automóvil, para intensificar las acciones en la reutilización y el reciclado de materiales en la producción de productos más respetuosos con el medio ambiente, mediante la adopción de EI (Han y Chen, 2021), ya que esto permitiría no solo reducir los impactos negativos en el medio ambiente, sino también mejorar su nivel de competitividad (Wang, Font y Liu, 2020). Además, la RA impuesta a las empresas manufactureras para proteger el medio ambiente puede generar un aumento significativo no solo de la demanda de productos ecológicos, sino también puede estimular el desarrollo de técnicas innovadoras para mejorar el comportamiento medioambiental (Fernández, Torrecillas y Labra, 2021). Así, considerando la información presentada anteriormente, es posible plantear la siguiente hipótesis de investigación:

H1: La normativa medioambiental tiene importantes efectos positivos en la ecoinnovación.

2.2 Ecoinnovación y rendimiento sostenible

La literatura estableció que los factores internos como los recursos disponibles en las empresas, la estructura y las capacidades esenciales determinan en un alto porcentaje la implementación de la EI, mientras que la presión externa ejercida por los consumidores, los clientes, los grupos ambientales y la administración pública induce a las empresas manufactureras a ser más recursivas en la adopción de prácticas ambientales (Cai y Li, 2018). Además, estudios recientes han establecido que la EI tiene efectos positivos significativos en el DS de las empresas manufactureras (por ejemplo; Maldonado-Guzmán y Garza (2020), Almeida y Wasim (2023) y Michalski, Montes-Botella y Guevara Piedra (2023)), ya que la EI se considera hoy en día como un negocio estratégico que agrega valor a los clientes y empresas, que contribuye a mejorar tanto el DS como a reducir los costos e impactos ambientales (Tseng, Chang y Chen, 2021).

Asimismo, la EI puede sustituir los productos existentes en las empresas manufactureras por productos ecológicos más respetuosos con el medio ambiente, que generalmente reducen los impactos negativos para el medio ambiente (Cai y Li, 2018), y pueden mejorar la eficiencia de los recursos y las materias primas, reducir el desperdicio de materiales y reducir significativamente los costes asociados a la generación de contaminantes y CO_2 por

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

no cumplir con la RA (Cai y Li, 2018). Además, los productos EI pueden generar ganancias o beneficios adicionales que permitirán a las empresas manufactureras obtener los recursos económicos y financieros necesarios para desarrollar actividades de EI, y establecer una imagen corporativa de responsabilidad de cuidado ambiental, implementar una diversificación de sus ecoproductos y aumentar su cuota de mercado (Cai y Li, 2018). Además, las empresas manufactureras que han adoptado la EI suelen tener una mayor productividad por empleado, y una mayor productividad económica y de servicios especiales que las empresas que aún no lo han hecho (Hojnik y Ruzzier, 2016).

Además, muchos estudios han identificado diferentes factores determinantes en la adopción y aplicación de la EI, como la regulación (Han y Chen, 2021; Wasiq, Kamal y Ali, 2023), el apoyo gubernamental (Wang, Font y Liu, 2020), la presión administrativa (Long y col., 2020; Wang, Font y Liu, 2020), la presión del mercado (Chen y Liu, 2019; Wasiq, Kamal y Ali, 2023), los factores tecnológicos (Andersson, Moen y Brett, 2020; Wasiq, Kamal y Ali, 2023), y el desempeño empresarial (Yurdakul y Kazan, 2020; Geng, Lai y Zhu, 2021). Sin embargo, son relativamente pocos los estudios publicados que han explorado la influencia de la EI en el DS (Maldonado-Guzmán y Garza, 2020; Almeida y Wasim, 2023). Según Wang, Font y Liu (2020) y Wasiq, Kamal y Ali (2023), el apoyo gubernamental es esencial para fomentar la competencia y la promoción de las tecnologías innovadoras.

En los últimos años, ha habido un creciente interés por parte de los académicos a analizar y discutir sobre la adopción de la EI (por ejemplo; Mercado-Caruso y col. (2020), Zhang y col. (2020), Fernández, Torrecillas y Labra (2021), Geng, Lai y Zhu (2021), Wasiq, Kamal y Ali (2023) y Almeida y Wasim (2023)). Uno de los factores clave en la adopción e implementación de la EI en las empresas manufactureras, incluida la industria automotriz, es el creciente interés que tienen los consumidores en la compra de productos respetuosos con el medio ambiente, que está estrechamente relacionado con el compromiso y el deseo de expresar identidad a través de la compra de productos verdes (Fernández, Torrecillas y Labra, 2021; Rana y Solaiman, 2022; Kautish y Khare, 2022), que alienta a las empresas manufactureras a aplicar prácticas de EI para mejorar sus productos, procesos y sostenibilidad de los sistemas de gestión (Afshari, Searcy y Jaber, 2020; Chang, Cheah y Amran, 2021).

En este contexto, la EI se clasifica normalmente en la bibliografía como una innovación relacionada con el medio ambiente (Wang, Font y Liu, 2020; Chang, Cheah y Amran, 2021), en particular porque se ha demostrado que la EI genera un impacto positivo en los niveles ambientales de las empresas manufactureras, como la rentabilidad (Kraus, Rehman y García, 2020; Achmad y col., 2023), el rendimiento social (Wang, Font y Liu, 2020) y DS (Singh y col., 2020; Al-Hanakta y col., 2023). Además, estudios recientes (por ejemplo; Han y Chen (2021) y Almeida y Wasim (2023)), sugieren que la RA puede alentar a las empresas manufactureras a implementar actividades de EI, lo que puede generar un mayor nivel de DS. Así, considerando la información presentada anteriormente, es posible plantear la siguiente hipótesis de investigación:

H2: La ecoinnovación tiene efectos positivos significativos en el rendimiento sostenible.

Para responder a las dos hipótesis de investigación establecidas, se realizó un estudio empírico en empresas manufactureras de la industria automotriz mexicana, analizando particularmente la relación entre RA, EI y DS. En la primera fase del estudio, se realizó un "Panel Empresarial" en el que participaron tres académicos del área de innovación y cinco empresarios de la industria automotriz y dos representantes de agencias gubernamentales relacionadas con la RA. Los resultados obtenidos en esta primera fase permitieron diseñar un cuestionario para recolectar la información. Se aplicó una prueba piloto a diez empresarios de la industria automotriz, realizando pequeños ajustes en la escritura, apariencia y ortografía. Los estudios piloto son esenciales para garantizar la validez cuando los cuestionarios se autoadministran o contienen escalas desarrolladas por el mismo (Bryman, 2016; Hair y col., 2016).

2.3 Diseño de muestra y recopilación de datos

El marco de referencia utilizado en este estudio fue el directorio de las empresas de la industria automotriz mexicana, que para el 30 de noviembre de

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

2019 había registrado 909 firmas pertenecientes a diversas cámaras empresariales locales, regionales y nacionales, por lo que el estudio empírico no se enfocó en un grupo o asociación empresarial en particular. Además, la encuesta para la recolección de información se aplicó a una muestra de 460 empresas seleccionadas por muestreo aleatorio simple, con un error máximo de $\pm$ 4% y un nivel de confiabilidad de 95%. La encuesta se aplicó de enero a marzo de 2020. Asimismo, se entregó el cuestionario al gerente de la empresa quien designó a las personas responsables de cada área para responder las preguntas que les correspondían, obteniendo información de los expertos de cada área de la organización.

2.3.1 Desarrollo de medidas

La medición de la RA es una adaptación a la escala establecida por Xie, Yuan y Huang (2017) y Pan y col. (2017), quienes consideraron que la RA puede medirse a través de 4 ítems. La medición de la EI corresponde a una adaptación de las escalas propuestas por Hojnik, Ruzzier y Lipnik (2014) y Segarra-Oña, Peiró y Payá (2014), quienes miden el EI a través de 4 ítems, los procesos EI a través de 4 ítems y la gestión EI a través de 6 ítems.

Finalmente, la medición de la DS representa una adaptación a la escala propuesta por Gadenne y col. (2012), quienes midieron este constructo a través de 5 ítems. Se eligió una escala tipo Likert de cinco puntos para lograr un equilibrio entre la complejidad para los encuestados y la precisión para el análisis (Forza, 2016; Hair y col., 2016). En el Tabla 1 se muestran los elementos de las cinco escalas utilizadas en esta investigación.

Tabla 1. Evaluación del modelo de medición

Indicadores	Construcciones
Regulación ambiental (RA)	
RA1	Regulación de las emisiones de contaminantes al medio ambiente
RA2	Impuesto sobre vertidos contaminantes
RA3	Uso de energías renovables
RA4	Inversiones vegetales en nuevos proyectos de mejora ambiental local
Ecoinnovación de productos (EPI)	
EPI1	Mejora constantemente los estándares del ciclo de vida del producto y realiza estudios del ciclo de vida del producto
EPI2	Utiliza o desarrolla nuevas fuentes de energía con tendencia a reducir las emisiones de CO_2
EPI3	Utiliza el sistema de etiqueta ecológica que exige cada país de destino para sus productos
EPI4	Utiliza y elabora componentes y materiales ecoinnovadores que están hechos de materias primas recicladas
Ecoinnovación de procesos (EP)	
EP1	Tratar sus aguas residuales
EP2	Utiliza métodos de esterilización para sus componentes o dispositivos tecnológicos
EP3	Produce o utiliza componentes de tela que utilizan tecnologías de desinfección de la tela
EP4	Utiliza papel ecológico o reciclable en sus procesos
Gestión de Eco-innovación (GE)	
GE1	Cuenta con un sistema de gestión que reutiliza componentes y equipos obsoletos
GE2	Tiene una certificación ISO 14001 o similar
GE3	Cuenta con auditorías constantes de ahorro de energía y ecología por parte de las autoridades estatales y/o municipales de su ubicación
GE4	Realiza constantemente seminarios o cursos de formación para el personal relacionado con la ecoinnovación
GE5	Cuenta con políticas bien definidas que fomentan y apoyan las actividades de ecoinnovación en toda la organización

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

GE6	Cuenta con un sistema de monitoreo y control de las aguas residuales generadas por la empresa
Desarrollo sostenible (DS)	
DS1	Tiene entre sus objetivos el cuidado del medio ambiente
DS2	Realiza grandes esfuerzos para promover el cuidado del medio ambiente
DS3	Tiene un gran compromiso para invertir en proyectos que protejan el medio ambiente
DS4	Discute con frecuencia los resultados del cuidado del medio ambiente dentro de la organización.
DS5	Tienen un excelente desempeño en la protección del medio ambiente en comparación con otras empresas de la misma industria o sector.

Debido a que los datos se recogieron mediante un cuestionario aplicado al mismo informante (gerente de la empresa), existe la posibilidad de que haya sesgos que podrían generar errores de tipo I (falso positivo) o tipo II (falso negativo) considerados en este estudio. La evaluación de la varianza se realizó a través del método común (CMV), siguiendo las recomendaciones de Podsakoff, MacKenzie y Podsakoff (2012). El método más utilizado por la comunidad científica y académica para verificar el posible efecto del CMV es la prueba de *un factor de Harman* (Podsakoff y col., 2003), que indica que todos los ítems de la muestra se midieron siguiendo un análisis factorial exploratorio (AFE), forzando la extracción a un solo factor (Iverson y Maguire, 2000; Aulakh y Gencturk, 2000).

Para verificar la idoneidad de los datos y el posible efecto del CMV, se aplicó un AFE utilizando el método de componentes principales y rotación varimax, encontrando un valor KMO = 0,85 y una prueba de Bartlett estadísticamente significativa ($X^2_{(1,035)}$ = 6.567,05; p $<$ 0,000). Si existiera algún inconveniente en los datos o en el CMV, el factor común extraído debería tener un valor superior al 50 % de la varianza extraída (Podsakoff y col., 2003), pero el factor común extraído de la aplicación de la AFE es del 34,7 %, que es muy inferior al valor recomendado, lo que indica la inexistencia de CMV, que no parece tener ningún efecto en las relaciones propuestas entre las variables (Podsakoff, MacKenzie y Podsakoff, 2012).

2.3.2 Confiabilidad y validez de las escalas de medición

Para evaluar la confiabilidad y validez de las tres escalas de medición se aplicó un Análisis Factorial Confirmatorio (AFC), utilizando el método de máxima verosimilitud con el apoyo del software EQS 6.2 (Bentler, 2005; Brown, 2006; Byrne, 2006). Por lo tanto, para la medición de la confiabilidad se utilizó el Índice de Confiabilidad Alfa y Compuesto (ICC) de Cronbach (Bagozzi y Yi, 1988), y de acuerdo con los resultados obtenidos en el AFC todos los valores de las tres escalas resultaron superiores a 0,7 para ambos índices, lo que evidencia la confiabilidad de las escalas y justifica su confiabilidad interna (Nunally, 1994; Hair y col., 2014). Además, como prueba de la validez convergente, los resultados de la AFC indican que todos los ítems de factores relacionados son significativos (p $<$ 0,001), y el tamaño de todas las cargas de factores estandarizados es mayor a 0,60 (Bagozzi y Yi, 1988).

Los resultados de la aplicación del AFC se muestran en la Tabla 2 y sugieren que el modelo de medición proporciona un buen ajuste de los datos estadísticos (SBX^2 = 776,804; gf = 2202; p = 0,000; NFI = 0,888; NNFI = 0,904; CFI = 0,916; RMSEA = 0,074). Además, la Tabla 2 muestra una alta consistencia interna de los constructos, en cada caso el *Alfa de Cronbach* supera el valor de 0,70 recomendado por Nunally (1994). El ICC representa la varianza extraída entre el grupo de variables observadas y el constructo (Fornell y Larcker, 1981), por lo que se considera deseable un ICC mayor a 0,60 (Bagozzi y Yi, 1988), y en este estudio este valor es significativamente mayor. Se calculó el Índice de Varianza Extraída (IVE) para cada uno de los constructos, resultando un IVE mayor a 0,50 (Fornell y Larcker, 1981), en este trabajo se supera el 0,50 en todos los factores.

Además, se midió la validez discriminante del modelo teórico de RA, EI y DS mediante dos pruebas, las cuales se presentan en la Tabla 3. En primer lugar, se presenta la *prueba del intervalo de confianza*. (Anderson y Gerbing, 1988), que establece que con un intervalo de confianza del 95 %, ninguno de

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

los elementos individuales de los factores latentes de la matriz de correlación tiene el valor de 1. En segundo lugar, la *prueba de varianza extraída* (Fornell y Larcker, 1981), que establece que la varianza extraída de cada par de constructos es menor que su IVE correspondiente. Por lo tanto, de acuerdo con los resultados obtenidos de la aplicación de ambas pruebas, es posible concluir que ambas pruebas son suficientes para determinar la existencia de la validez discriminante.

3 Resultados y Discusión

Para responder a las dos hipótesis planteadas en este estudio empírico, se aplicó un modelo de ecuaciones estructurales (MEE) con el apoyo del software EQS 6.2 (Bentler, 2005; Byrne, 2006; Brown, 2006), analizando la validez nomológica del modelo teórico de RA, EI y DS a través de la prueba Chi-cuadrada, mediante la cual se compararon los resultados obtenidos entre el modelo teórico y el modelo de medición, obteniendo resultados no significativos que permiten establecer una explicación de las relaciones observadas entre los constructos (Anderson y Gerbing, 1988). La Tabla 4 muestra los resultados obtenidos de la aplicación del MEE.

En la tabla 4 se muestran los resultados obtenidos de la aplicación del MEE y, con respecto a la hipótesis $\mathbf{H}_1$, los resultados obtenidos, β = 0,989 p $<$ 0,001, indican que los RA tienen efectos positivos significativos en la EI de las empresas manufactureras. En cuanto a la hipótesis $\mathbf{H}_2$, los resultados obtenidos, β = 0,265 p $<$ 0,001, indican que la EI tiene efectos positivos significativos sobre la DS de las empresas manufactureras. En resumen, se puede corroborar la existencia de una relación positiva significativa entre la RA, EI y DS.

Los resultados seleccionados en este estudio empírico tienen diferentes implicaciones tanto para los gerentes como para las empresas manufactureras. Los datos derivados de la aplicación de las 460 encuestas confirmaron la realización de un análisis general de la relación entre RA, EI (medios a través de ecoinnovación en productos, procesos y gestión), y DS en una industria en particular (industria automotriz mexicana), por lo que en futuros estudios estos tres constructos serán relevantes en estudios longitudinales o en casos de estudios de éxito. Sin embargo, desde el punto de vista de la evolución de la innovación, los resultados indican que el cumplimiento de la RA mejora las actividades de la EI de las empresas manufactureras (You, Zhang y Yuan, 2019; Dewick, Maytorena y Winch, 2019).

De igual forma, la RA permite a las empresas manufactureras no solo implementar actividades de ecoinversión y ecoplanificación en la EI de productos, procesos y gestión, como habían sugerido estudios previos (por ejemplo; Wakeford y col. (2017) y Guo, Qu y Tseng (2017)), sino que también facilita el cumplimiento de los objetivos de reducir los impactos negativos en el medio ambiente y reducir los riesgos humanos y ambientales (Severo, Guimarães y Dorion, 2018). Sin embargo, aunque la implementación de la EI está estrechamente influenciada por la RA y las regulaciones financieras, también es cierto que es importante que las autoridades gubernamentales reformen su sistema fiscal para promover la implementación de la EI entre las empresas manufactureras (You, Zhang y Yuan, 2019).

Además, se ha demostrado en la literatura que para que la RA sea más efectiva ésta tiene que ser rigurosa, flexible y ejecutable (por ejemplo; Ribeiro y Kruglianskas (2015)), porque esto permitiría una mayor implementación de la EI en las empresas manufactureras (Yang y Yang, 2015; Yuan, Ren y Chen, 2017), ya que la RA estimula la implementación de la EI porque reduce los costos para el cumplimiento (Dewick, Maytorena y Winch, 2019), a pesar de que el concepto de la EI es demasiado complejo y requiere la aplicación de los tres tipos de conocimiento (EI de productos, procesos y gestión) para obtener mejores resultados (Marzucchi y Montresor, 2017).

A pesar de que se ha proporcionado evidencia empírica de la relación positiva entre la RA y la EI de productos, procesos y manejo (por ejemplo; Cai y Li (2018) y You, Zhang y Yuan (2019)), existen pocos estudios que analicen y discutan la EI desde un punto de vista general, sin embargo, los resultados obtenidos en este estudio son consistentes y similares a los obtenidos en los estudios mencionados.

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Tabla 2. Consistencia interna y validez convergente del modelo teórico

Variable	Indicador	Carga factorial	Valor t	Alfa de Cronbach	ICC	IVE
Normativa medioambiental	RA1	0,719***	1 000 [a]	0,913	0,914	0,728
	RA2	0,852***	18,058			
	RA3	0,954***	19,953			
	RA4	0,871***	18,483			
Ecoinnovación de productos **(F1)**	EPI1	0,668***	1 000 [a]	0,874	0,875	0,639
	EPI2	0,801***	14,877			
	EPI3	0,893***	16,025			
	EPI4	0,819***	15,137			
Ecoinnovación de procesos **(F2)**	EP1	0,859***	1 000 [a]	0,916	0,917	0,736
	EP2	0,884***	24,806			
	EP3	0,877***	24,505			
	EP4	0,809***	21,391			
Gestión de Eco-innovación **(F3)**	GE1	0,776***	1 000 [a]	0,926	0,927	0,681
	GE2	0,758***	17,421			
	GE3	0,862***	20,463			
	GE4	0,889***	21,279			
	GE5	0,886***	21,197			
	GE6	0,769***	17,730			
Ecoinnovación	**F1**	0,815***	5,806	0,821	0,822	0,609
	F2	0,686***	5,169			
	F3	0,831***	6,133			
Desarrollo sostenible	DS1	0,751***	1 000 [a]	0,898	0,899	0,642
	DS2	0,755***	16,237			
	DS3	0,850***	18,450			
	DS4	0,858***	18,634			
	DS5	0,786***	16,959			

S-BX^2 (df = 220) = 776,804; p $<$ 0,000; NFI = 0,888; NNFI = 0,904; CFI = 0,916; RMSEA = 0,074
[a] = Parámetros restringidos a dicho valor en el proceso de identificación
*** = p $<$ 0,01

Por lo tanto, la RA promueve, entre las empresas manufactureras, no solo el desarrollo de las diferentes actividades de la EI de productos, procesos y gestión que son más respetuosos con el medio ambiente, sino que también la mejora significativa de DS (Hojnik y Ruzzier, 2016).

Las empresas manufactureras se encuentran cada vez más bajo presión de diferentes grupos ambientales, consumidores, proveedores, comunidades y sociedad en general para adoptar medidas más efectivas del cuidado del medio ambiente y el desarrollo sostenible, por lo que una de las alternativas que están considerando los investigadores, académicos y profesionales de la industria es EI.

Sin embargo, para que las empresas manufactureras contribuyan a reducir el cambio climático actual, se requiere el pleno cumplimiento de las exigencias ambientales del gobierno, ya que esto les permitirá reducir significativamente el uso de energía y materias primas (Fellner y col., 2017), residuos (Tisserant y col., 2017) y materias primas (Tisserant y col., 2017).

4 Conclusiones

Los resultados obtenidos en este estudio permiten obtener diferentes conclusiones, y entre las más

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Tabla 3. Validez discriminante del modelo teórico

Variables	Regulación medioambiental	Eco-innovación	Desarrollo sostenible
Regulación medioambiental	**0,728**	0,045	0,095
Ecoinnovación	0,165 - 0,261	**0,609**	0,068
Desarrollo sostenible	0,244 - 0,372	0,203 - 0,319	**0,642**

La diagonal representa el índice de varianza extraída (IVE), mientras que encima de la diagonal se presenta la varianza (correlación al cuadrado). Debajo de la diagonal se presenta la correlación estimada de los factores con un intervalo de confianza del 95 %.

Tabla 4. Resultados de la MEE

Hipótesis	Relación estructural	Coeficiente estandarizado	Valor t
$\mathbf{H}_1$: A mayor nivel de regulación ambiental, mayor nivel de ecoinnovación.	R. Ambiental → Eco-inn.	0,989***	20,409
$\mathbf{H}_2$: A mayor nivel de ecoinnovación, mayor nivel de desarrollo sostenible.	Eco-inn. → D. sostenible	0,265***	14,074

S-BX^2 (df = 214) = 685,502; p < 0,000; NFI = 0,901; NNFI = 0,916; CFI = 0,929; RMSEA = 0,069
*** = P < 0,01
Fuente: Elaboración propia

importantes están las siguientes. Una primera conclusión es el modelo teórico que se considera tiene una alta consistencia interna, generando una fuerte correlación entre los tres constructos analizados, lo que determina la aceptación de las dos hipótesis de investigación propuestas. Una segunda conclusión es el mismo modelo teórico utilizado que tiene una visión general de las principales actividades de la EI (ecoinnovación de productos, ecoinnovación de procesos y ecoinnovación de gestión). Una tercera conclusión es que son pocos los estudios publicados que han analizado y discutido la relación entre RA, EI y DS, en comparación con los estudios que se han orientado hacia la conceptualización (You, Zhang y Yuan, 2019), que desde nuestro punto de vista carecen de un aporte específico.

Una cuarta conclusión es que el análisis de la relación entre estos tres constructos importantes es un tema relativamente reciente en la literatura, a pesar de que la relación de estos tres constructos está ganando cada vez más atención en los investigadores, académicos y profesionales de la industria. Los resultados empíricos no son necesarios para establecer una relación total, por lo que es posible concluir que la relación entre RA, EI y DS es un tema inconcluso que está abierto a discusión (Yuan y Xiang, 2018). Una quinta conclusión es que el análisis de la relación entre los tres constructos analizados en este estudio empírico en países de economías emergentes, como es el caso de México, no se ha explorado en la literatura, por lo que este estudio aporta evidencia empírica y nuevos conocimientos de la relación entre los tres constructos.

Una sexta y última conclusión es que los resultados de este estudio empírico tendrán una implicación en la generación de conocimiento, tanto de estudios publicados previamente que analizaron los efectos de la RA y la EI (por ejemplo; (Yuan y Xiang, 2018; Dewick, Maytorena y Winch, 2019; You, Zhang y Yuan, 2019)), como de aquellos estudios que analizan la relación entre la EI y el DS (por ejemplo; **Gou2017**; Yuan, Ren y Chen (2017) y Cai y Li (2018)) incorporándolos a un modelo que analiza simultáneamente los cuatro tipos de RA y los tres tipos de EI más citados en la literatura, lo que permite concluir en términos generales que la

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

RA sí permite un aumento significativo de la EI.

Este estudio tiene diferentes limitaciones que deben considerarse antes de analizar e interpretar los resultados obtenidos. Una primera limitación de este estudio es el uso de las escalas de medición de RA, EI y DS, ya que estos tres constructos importantes se midieron a través de indicadores subjetivos obtenidos de la encuesta. Por lo tanto, en futuros estudios será necesario incorporar algunos datos objetivos de las empresas manufactureras (por ejemplo, certificaciones totales en normas internacionales y nacionales, monto del pago de impuestos por emisiones de gases contaminantes, cantidad de EI realizada, porcentaje de uso de energía renovable, porcentaje de uso de agua tratada), para verificar si los resultados obtenidos difieren o no de los obtenidos en este estudio.

Una segunda limitación es que la RA y la EI (EI de productos, procesos y gestión) pueden tener mejores resultados si se analizan y discuten de manera desagregada, o si se incorpora una variable moderadora en el análisis de las características particulares de las empresas manufactureras (por ejemplo, tamaño, subsector, ubicación), o de los gerentes (por ejemplo, liderazgo, experiencia, habilidades). Por lo tanto, en futuros estudios será necesario utilizar algunas variables que moderen los efectos que ejerce la RA sobre la EI, y esto en su opinión sobre la EP, para corroborar si los resultados obtenidos difieren de los resultados encontrados en este estudio.

Una tercera limitación es que este estudio consideró solo cuatro tipos de RA y los tres tipos de EI más citados en la literatura, por lo que en estudios futuros sería necesario considerar otros tipos de EI (por ejemplo, marketing, tecnología, sistemas), para corroborar si los resultados obtenidos son similares a los obtenidos en este estudio. Una cuarta y última limitación de estos resultados es que las encuestas se aplicaron solo en las firmas manufactureras de la industria automotriz mexicana, por lo que en estudios futuros sería conveniente aplicarlas en otros sectores para corroborar si los resultados obtenidos difieren o no de los resultados obtenidos en este estudio.

Contribución de los autores

GMG; Conceptualización, administración del proyecto, software, supervisión, escritura- borrador original, escritura-revision y edición. RJT; Curación de datos, análisis formal, investigación, software, escritura-revisión y edición. VMMM; Conceptualización, análisis formal, metodología, software, escritura-revisión y edición.

Referencias

Achmad, G. y col. (2023). «Eco-Innovation and SME Performance in Time of Covid-19 Pandemic: Moderating Role of Environmental Collaboration». En: *Emerging Science Journal* 7, 251-263. Online:https://n9.cl/zhgzl.

Afshari, H., C. Searcy y M. Jaber (2020). «The role of eco-innovation drivers in promoting additive manufacturing in supply chains». En: *International Journal of Production Economics* 223, 107538. Online:https://n9.cl/vshn8z.

Al-Hanakta, R. y col. (2023). «Eco-innovation influence on business performance in Jordanian micro, small and medium enterprises operating in the food processing sector». En: *Plos one* 18.2, e0281664. Online:https://n9.cl/6d7a3w.

Almeida, F. y J. Wasim (2023). «Eco-innovation and sustainable business performance: perspectives of SMEs in Portugal and the UK». En: *Society and Business Review* 18.1, 28-50. Online:https://n9.cl/3piem.

Anderson, J. y D. Gerbing (1988). «Structural equation modeling in practice: A review and recommended two-step approach.» En: *Psychological bulletin* 103.3, 411. Online:https://n9.cl/p5x3n.

Andersson, M., O. Moen y P. Brett (2020). «The organizational climate for psychological safety: Associations with SMEs' innovation capabilities and innovation performance». En: *Journal of Engineering and Technology Management* 55, 101554. Online:https://n9.cl/e5w6x.

Arranz, N., N. Arguello y J. de Arroyabe (2021). «How do internal, market and institutional factors affect the development of eco-innovation in firms?» En: *Journal of Cleaner Production* 297, 126692. Online:https://n9.cl/t4n5m.

Aulakh, P. y E. Gencturk (2000). «International principal-agent relationships: Control, governance and performance». En: *Industrial Marketing Management* 29.6, 521-538. Online:https://n9.cl/dgbtd.

Bagozzi, R. e Y. Yi (1988). «On the evaluation of structural equation models». En: *Journal of the academy of marketing science* 16, 74-94. Online:https://n9.cl/516v2.

Bentler, P. (2005). *EQS 6 Structural Equations Program Manual*. Encino, CA: Multivariate software.

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Bitencourt, C. y col. (2020). «Empirical generalizations in eco-innovation: A meta-analytic approach». En: *Journal of Cleaner Production* 245, 118721. Online:https://n9.cl/qo75x.

Brown, T. (2006). *Confirmatory Factor Analysis for Applied Research*. The Guilford Press.

Bryman, A. (2016). *Social Research Methods*. 5th. Oxford University Press.

Byrne, B. (2006). *Structural Equation Modeling with EQS, Basic Concepts, Applications, and Programming*. 2nd. LEA Publishers.

Cai, W. y G. Li (2018). «The drivers of eco-innovation and its impact on performance: Evidence from China». En: *Journal of Cleaner Production* 176, 110-118. Online:https://n9.cl/0wgfp.

Chang, P., J. Cheah y A. Amran (2021). «Eco-innovation practices and sustainable business performance: The moderating effect of market turbulence in the Malaysian technology industry». En: *Journal of Cleaner Production* 283, 124556. Online:https://n9.cl/4q9h0.

Chen, J. y L. Liu (2019). «Customer participation, and green product innovation in SMEs: The mediating role of opportunity recognition and exploitation». En: *Journal of Business Research* 119, 151-162. Online:https://n9.cl/yedn9.

Costa-Campi, M., J. García y Es. Martínez (2017). «What are the determinants of investment in environmental R&D?» En: *Energy Policy* 104, 455-465. Online:https://n9.cl/sd29h.

Dewick, P., E. Maytorena y G. Winch (2019). «Regulation and regenerative eco-innovation: the case of extracted materials in the UK». En: *Ecological Economics* 160, 38-51. Online:https://n9.cl/ps927.

Emina, K. (2021). «Sustainable development and the future generations». En: *Social Sciences, Humanities and Education Journal (SHE Journal)* 2.1, 57-71. Online:https://n9.cl/l18n9.

Fellner, J. y col. (2017). «Present potentials and limitations of a circular economy with respect to primary raw material demand». En: *Journal of Industrial Ecology* 21.3, 494-496. Online:https://n9.cl/8lr2g.

Fernández, S., C. Torrecillas y R. Labra (2021). «Drivers of eco-innovation in developing countries: The case of Chilean firms». En: *Technological Forecasting and Social Change* 170, 120902. Online:https://n9.cl/jybhz.

Fornell, C. y D. Larcker (1981). «Evaluating structural equation models with unobservable variables and measurement error». En: *Journal of marketing research* 18.1, 39-50. Online:https://n9.cl/uxr68.

Forza, C. (2016). «Surveys». En: ed. por C. Karlsson. 2nd. Routledge. Cap. Research Methods for Operations Management, págs. 54-73.

Frigon, A., D. Doloreux y R. Shearmur (2020). «Drivers of eco-innovation and conventional innovation in the Canadian wine industry». En: *Journal of Cleaner Production* 275, 124115. Online:https://n9.cl/q5037.

Gadenne, D. y col. (2012). «The influence of sustainability performance management practices on organisational sustainability performance». En: *Journal of Accounting & Organizational Change* 8.2, 210-235. Online:https://n9.cl/sm1r0.

García-Granero, E., L. Piedra y E. Galdeano (2020). «Measuring eco-innovation dimensions: The role of environmental corporate culture and commercial orientation». En: *Research Policy* 49.8, 104028. Online:https://n9.cl/h6ycg.

García-Parra, M. y col. (2022). «Los Objetivos de Desarrollo Sostenible en América: Panorama». En: *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida* 36.2, 46-59. Online:https://bit.ly/4aUrvUx.

Geng, D., K. Lai y Q. Zhu (2021). «Eco-innovation and its role for performance improvement among Chinese small and medium-sized manufacturing enterprises». En: *International Journal of Production Economics* 231, 107869. Online:https://n9.cl/faadc.

Geng, M. y L. He (2021). «Environmental regulation, environmental awareness and environmental governance satisfaction». En: *Sustainability* 13.7, 1-17. Online:https://n9.cl/izp36k.

Guo, J. y col. (2020). «Leveraging industrial-technological innovation to achieve sustainable development: A systems thinking perspective». En: *Plos one* 15.12, 1-23. Online:https://n9.cl/8ss0w.

Guo, L., Y. Qu y M. Tseng (2017). «The interaction effects of environmental regulation and technological innovation on regional green growth performance». En: *Journal of cleaner production* 162, 894-902. Online:https://n9.cl/nocu1.

Hair, J. y col. (2014). *Multivariate Data Analysis*. 7th. Pearson Education.

Hair, J. y col. (2016). *Essentials of Business Research Methods*. 3rd. Routledge.

Han, M. y W. Chen (2021). «Determinants of eco-innovation adoption of small and medium enterprises: An empirical analysis in Myanmar». En: *Technological Forecasting and Social Change* 173, 121146. Online:https://n9.cl/qmb1a.

Hojnik, J. y M. Ruzzier (2016). «What drives eco-innovation? A review of an emerging literature». En: *Environmental innovation and societal transitions* 19.1, 31-41. Online:https://n9.cl/wobsz.

Hojnik, J., M. Ruzzier y A. Lipnik (2014). «Pursuing Eco-Innovation Within Southeastern European Clusters.» En: *IUP Journal of Business Strategy* 11.3, 42-59. Online:https://n9.cl/h51ci.

Iverson, R. y C. Maguire (2000). «The relationship between job and life satisfaction: Evidence from a remote mining community». En: *Human relations* 53.6, 807-839. Online:https://n9.cl/8fpr9.

Kautish, P. y A. Khare (2022). «Antecedents of sustainable fashion apparel purchase behavior». En: *Journal of*

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Consumer Marketing 39.5, 475-487. Online:https://n9.cl/c6ulg.

Kraus, S., S. Rehman y F. García (2020). «Corporate social responsibility and environmental performance: The mediating role of environmental strategy and green innovation». En: *Technological forecasting and social change* 160, 120262. Online:https://n9.cl/15f36.

Liao, Y. y K. Tsai (2019). «Innovation intensity, creativity enhancement, and eco-innovation strategy: T he roles of customer demand and environmental regulation». En: *Business Strategy and the Environment* 28.2, 316-326. Online:https://n9.cl/0g4ip.

Liao, Zhongju (2018). «Environmental policy instruments, environmental innovation and the reputation of enterprises». En: *Journal of Cleaner Production* 171, 1111-1117. Online:https://n9.cl/i08nb.

Long, X. y col. (2020). «Green innovation efficiency across China's 30 provinces: estimate, comparison, and convergence». En: *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 25, 1243-1260. Online:https://n9.cl/aupxu.

Maldonado-Guzmán, G. y J. Garza (2020). «Eco-innovation practices' adoption in the automotive industry». En: *International Journal of Innovation Science* 12.1, 80-98. Online:https://n9.cl/54umg.

Marzucchi, A. y S. Montresor (2017). «Forms of knowledge and eco-innovation modes: Evidence from Spanish manufacturing firms». En: *Ecological Economics* 131, 208-221. Online:https://n9.cl/gcdhk.

Mercado-Caruso, N. y col. (2020). «Identifying endogenous and exogenous indicators to measure eco-innovation within clusters». En: *Sustainability* 12.15, 6088. Online:https://n9.cl/n6icv.

Michalski, M., J. Montes-Botella y W. Guevara Piedra (2023). «Eco-innovation and performance of SMEs in Ecuador». En: *Academia Revista Latinoamericana de Administración* 36.3, 388-406. Online:https://n9.cl/zjqhl.

Muhammad, S., X. Long y M. Salman (2020). «COVID-19 pandemic and environmental pollution: A blessing in disguise?» En: *Science of the total environment* 728, 138820. Online:https://n9.cl/wtpk7.

Nunally J.and Bernstein, I. (1994). *Psychometric Theory*. 3rd. Routledge.

Pan, X. y col. (2017). «Dynamic relationship among environmental regulation, technological innovation and energy efficiency based on large scale provincial panel data in China». En: *Technological Forecasting and Social Change* 144, 428-435. Online:https://n9.cl/xyv4q.

Podsakoff, P., S. MacKenzie y N. Podsakoff (2012). «Sources of method bias in social science research and recommendations on how to control it». En: *Annual review of psychology* 63, 539-569. Online:https://n9.cl/29oe2.

Podsakoff, P. y col. (2003). «Common method biases in behavioral research: A critical review of the literature and recommended remedies». En: *Journal of Applied Psychology* 88.5, 879-903. Online:https://n9.cl/bek0c.

Porter, M. y C. van der Linde (1995). «Green and Competitive: Ending the Stalemate». En: *Harvard Business Review* 73.1, 120-134. Online:https://bit.ly/47qYSLw.

Rana, S. y M. Solaiman (2022). «Moral identity, consumption values and green purchase behaviour». En: *Journal of Islamic Market* 14.10, 2550-2574. Online:https://n9.cl/strq73.

Ribeiro, F. e I. Kruglianskas (2015). «Principles of environmental regulatory quality: A synthesis from literature review». En: *Journal of Cleaner Production* 1.96, 58-76. Online:https://n9.cl/0a8yg.

Sanni, M. (2018). «Drivers of eco-innovation in the manufacturing sector of Nigeria». En: *Journal of Cleaner Production* 6.131, 303-314. Online:https://n9.cl/4hiyph.

Segarra-Oña, M., A. Peiró y A. Payá (2014). «Factors influencing automobile firm's eco-innovation orientation». En: *Engineering Management Journal* 26.1, 31-38. Online:https://n9.cl/n4sce.

Severo, E., J. de Guimarães y E. Dorion (2018). «Cleaner production, social responsibility and eco-innovation: Generations' perception for a sustainable future». En: *Journal of Cleaner Production* 186, 91-103. Online:https://n9.cl/on7x9.

Shu, C. y col. (2016). «How green management influences product innovation in China: The role of institutional benefits». En: *Journal of business ethics* 133, 471-485. Online:https://n9.cl/v1gxk.

Singh, S. y col. (2020). «Green innovation and environmental performance: The role of green transformational leadership and green human resource management». En: *Technological forecasting and social change* 150, 119762. Online:https://n9.cl/jv1sg.

Tisserant, A. y col. (2017). «Solid waste and the circular economy: a global analysis of waste treatment and waste footprints». En: *Journal of Industrial Ecology* 21.3, 628-640. Online:https://n9.cl/1nmbc.

Tseng, C., K. Chang y H. Chen (2021). «Strategic orientation, environmental management systems, and eco-innovation: Investigating the moderating effects of absorptive capacity». En: *Sustainability* 13.21, 12147. Online:https://n9.cl/rgqpa.

Wakeford, J. y col. (2017). «Innovation for green industrialization: An empirical assessment of innovation in Ethiopia's cement, leather and textile sectors». En: *Journal of Cleaner Production* 166, 503-511. Online:https://n9.cl/576sg.

Wang, F. (2023). «The intermediary and threshold effect of green innovation in the impact of environmental regulation on economic Growth: Evidence from China». En: *Ecological Indicators* 153, 110371. Online:https://n9.cl/magjd.

Wang, J. y G. Zhang (2022). «Can environmental regulation improve high-quality economic development in China? The mediating effects of digital economy».

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

En: *Sustainability* 14.19, 12143. Online:https://n9.cl/lwxg0.

Wang, Y., X. Font y J. Liu (2020). «Antecedents, mediation effects and outcomes of hotel eco-innovation practice». En: *International Journal of Hospitality Management* 85, 102345. Online:https://n9.cl/3u0mo.

Wasiq, M., M. Kamal y N. Ali (2023). «Factors Influencing Green Innovation Adoption and Its Impact on the Sustainability Performance of Small-and Medium-Sized Enterprises in Saudi Arabia». En: *Sustainability* 15.3, 2447. Online:https://n9.cl/bekj5.

Xie, B. y col. (2023). «The impact of environmental regulation on capacity utilization of China's manufacturing industry: An empirical research based on the sector level». En: *Ecological Indicators* 148.1, 110085. Online:https://n9.cl/bqx0h.

Xie, R., Y. Yuan y J. Huang (2017). «Different types of environmental regulations and heterogeneous influence on "green" productivity: evidence from China». En: *Ecological economics* 132, 104-112. Online:https://n9.cl/teq2l.

Xu, W., J. Zheng y C. Liu (2020). «Environmental regulation, green technology innovation, and industrial structure upgrading: The road to the green transformation of Chinese cities». En: *Energy Economics* 19.1, págs. 31-38.

Yang, F. y M. Yang (2015). «Analysis on China's eco-innovations: Regulation context, intertemporal change and regional differences». En: *European Journal of Operational Research* 247.3, 1003-1012. Online:https://n9.cl/hqicf.

You, D., Y. Zhang y B. Yuan (2019). «Environmental regulation and firm eco-innovation: Evidence of moderating effects of fiscal decentralization and political competition from listed Chinese industrial companies». En: *Journal of cleaner production* 207, 1072-1083. Online:https://n9.cl/6e0x4y.

Yuan, B., S. Ren y X. Chen (2017). «Can environmental regulation promote the coordinated development of economy and environment in China's manufacturing industry? A panel data analysis of 28 sub-sectors». En: *Journal of cleaner production* 149, 11-24. Online:https://n9.cl/gwt23w.

Yuan, B. y Q. Xiang (2018). «Environmental regulation, industrial innovation and green development of Chinese manufacturing: Based on an extended CDM model». En: *Journal of cleaner production* 176, 895-908. Online:https://n9.cl/dl4pc.

Yurdakul, M. y H. Kazan (2020). «Effects of eco-innovation on economic and environmental performance: Evidence from Turkey's manufacturing companies». En: *Sustainability* 12.8, 3167. Online:https://n9.cl/4xmgu.

Zhang, Y. y col. (2020). «Critical success factors of green innovation: Technology, organization and environment readiness». En: *Journal of Cleaner Production* 264, 121701. Online:https://n9.cl/2vfc5.

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

La granja:
Revista de
Ciencias de la Vida

pISSN:1390-3799; eISSN:1390-8596

http://doi.org/10.17163/lgr.n39.2024.06

Artículo científico / Scientific paper

Ciencias de la Tierra

Retroceso del glaciar del Carihuairazo y sus implicaciones en la comunidad de Cunucyacu

Carihuairazo glacier retreat and its perception in the Cunucyacu community

David Hidalgo*[1], Christian Domínguez*[2], Marcos Villacís[3,4], Jean-Carlos Ruíz[5,6], Luis Maisincho[7], Bolívar Cáceres[7], Verónica Crespo-Pérez[8], Thomas Condom[6] y David Piedra[3]

[1]*Área de ambiente y sustentabilidad. Universidad Andina Simón Bolívar. Quito, Ecuador.*
[2]*Carrera de Ingeniería Civil. Universidad Politécnica Salesiana, 170702, Quito, Ecuador.*
[3]*Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental, Escuela Politécnica Nacional, 170407, Quito, Ecuador.*
[4]*Centro de Investigación y Estudios en Ingeniería de los Recursos Hídricos, 170525, Quito, Ecuador.*
[5]*UMR 7619 METIS , CASE 105,Sorbonne Université, 4 place Jussieu, F-75005, Paris, France. Univiersité Grenoble Alpes.*
[6]*Insitut des Géoscience d l ´ Environnment (IGE, UMR 5001), Univ. Grenoble Alpes, IRD, CNRS, Grenoble INP, 3800, Grenoble, France.*
[7]*Instituto Nacional de Metereología e Hidrología, Quito, Ecuador.*
[8]*Laboratorio de Limnología, Museo QCAZ I, Escuela de Ciencias Biológicas, Pontificia Universidad Católica del Ecuador, 170525, Quito, Ecuador.*

*Autor para correspondencia: davidhidalgoponce@gmail.com y cdominguez@ups.edu.ec

Manuscrito recibido el 13 de octubre de 2022. Aceptado, tras revisión, el 31 de diciembre de 2023. Publicado el 1 de marzo de 2024.

Resumen

El retroceso de los glaciares es una realidad en toda la cordillera de los Andes, sobre todo en montañas de baja altitud. Uno de estos casos es la pérdida de la masa de hielo remanente en el Carihuairazo (Tungurahua, Ecuador), que en los últimos años ha experimentado un retroceso considerable. En esta investigación se intenta caracterizar el retroceso de este glaciar y su implicación en la comunidad más cercana (Cunucyacu) por medio de la aplicación de una metodología de múltiples fuentes que incluye la recopilación de aerofotografías del glaciar, datos de estaciones meteorológicas cercanas, uso de datos de reanálisis del clima global, entrevistas a miembros de la comunidad y a andinistas que trabajan y frecuentan la zona. Para caracterizar la evolución de la masa del glaciar aplicamos un modelo hidroglaciológico que usa como entrada datos de series meteorológicas y cuyos parámetros fueron calibrados con el registro fotográfico del contorno del glaciar. Como resultados se puede evidenciar una pérdida del glaciar para el 2021 equivalente al 99 % de su superficie en 1956 (0.34 km^2). El modelo logra simular la variación del área del glaciar durante 67 años, en donde se observa un decrecimiento continuo del glaciar a partir de 1978, con cortos periodos de recuperación y equilibrio, en donde la temperatura es la variable que mejor explica el retroceso del glaciar. El modelo no logra considerar el efecto de factores externos como el caso de la erupción del volcán Tungurahua que podría favorecer el retroceso del glaciar. El glaciar Carihuairazo se encuentra en una situación de inevitable desaparición y revela las vulnerabilidades de las comunidades que se enfrentan a este fenómeno como consecuencia del cambio climático.

Palabras clave: retroceso glaciar, glaciares, modelo hidroglaciológico, cambio climático, Carihuairazo, Cunucyacu.

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Abstract

The retreat of glaciers is a reality throughout the Andes Mountain range, especially in low-altitude mountains. One of these cases is the loss of the remaining ice mass in Carihuairazo (Tungurahua, Ecuador), which in recent years has experienced a considerable retreat. This research aims to characterize the retreat of this glacier and its implications for the nearby community (Cunucyacu) through the application of a multi-source methodology, which includes the collection of glacier aerial photographs, data from nearby meteorological stations, the use of global climate reanalysis data, interviews with community members, and mountaineers who work and frequent the area. To characterize the glacier's mass evolution, a hydroglaciological model was applied, using input data from meteorological series, and its parameters were calibrated with the photographic record of the glacier's outline. The results show a glacier loss of 99 % of its surface in 1956 (0.34 km^2) by 2021. The model successfully simulates the glacier area variation over 67 years, revealing a continuous decrease since 1978, with short periods of recovery and equilibrium, where temperature is the variable that best explains the glacier's retreat. However, the model fails to consider the effect of external factors, such as the eruption of the Tungurahua volcano that could enhance the glacier retreat. The Carihuairazo glacier is in a situation of inevitable disappearance, highlighting the vulnerabilities of communities facing this phenomenon as a consequence of climate change.

Keywords: Glacier retreat, glacier, hydroglaciological model, climate change, Carihuairazo, Cunucyacu.

Forma sugerida de citar: Hidalgo et al. (2024). Retroceso del glaciar del Carihuairazo y sus implicaciones en la comunidad de Cunucyacu. La Granja: Revista de Ciencias de la Vida. Vol. 39(1):92-115. http://doi.org/10.17163/lgr.n39.2024.06.

IDs Orcid:

Bolívar David Hidalgo Ponce: https://orcid.org/0000-0002-1430-8140
Jean-Carlos Ruíz-Hernández: https://orcid.org/0000-0002-7801-5566
Luis Maisincho: https://orcid.org/0000-0002-6078-1895
Bolívar Cáceres: https://orcid.org/0000-0002-2013-057X
Verónica Crespo-Pérez: https://orcid.org/0000-0002-8811-1965
Christian Domínguez: https://orcid.org/0000-0003-2971-7163
David Piedra: https://orcid.org/0000-0003-4435-3978
Thomas Condom: https://orcid.org/0000-0002-4408-8580
Marcos Joshua Villacís Erazo: https://orcid.org/0000-0002-4496-7323

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

1 Introducción

Los glaciares desempeñan un papel significativo en la sostenibilidad de los ecosistemas y el equilibrio ambiental de las regiones en donde se encuentran, como en los páramos (Aguilar-Lome y col., 2019; García, 2022). Los glaciares actúan como reservorios de agua, que inciden en todos los aspectos relacionados con su uso, tanto para riego como para consumo, además de su empleo para procesos mineros y de generación hidroeléctrica (Vuille, 2013; Naranjo-Silva, 2024). La disminución de caudales, asociados con el retroceso glaciar provoca escasez y genera conflictos por los derechos de uso entre los habitantes de zonas montañosas y empresas que quieren controlar el acceso al agua (Vuille, 2013). Además de contribuir con el abastecimiento de agua, regular el clima y mantener un hábitat para la biodiversidad, para Vilela (2011), mantienen una evidente influencia en los ámbitos de cultura, identidad, los imaginarios y turismo.

El Carihuairazo es un estrato volcán apagado que se ubica en la cordillera Occidental de los andes ecuatorianos. El glaciar contribuye a varios afluentes, pero principalmente a los ubicados hacia el flanco este de la montaña. Una de las poblaciones más cercanas al glaciar es la comunidad Cunucyacu, perteneciente a la parroquia Pilahuín, al sur oeste del cantón Ambato en la provincia de Tungurahua, en la zona centro del Ecuador y ubicada al norte del Carihuairazo. Actualmente, en la comunidad se percibe una disminución de la cantidad de agua originada en la montaña. Considerando los trabajos previos de Cáceres y Cauvy (2015), desde el año 2003 el retroceso del Carihuairazo ha sido evidente y este proceso apunta hacia su inevitable extinción (Francou y col., 2011), la misma que podría ocurrir en los próximos años. Postigo (2013) resalta el interés de conocer el impacto del retroceso glaciar desde la perspectiva de los varios actores involucrados en conflictos subyacentes, cada uno de ellos con intereses y prioridades tan distintas y enfrentadas entre sí. En este sentido, resultan valiosos los testimonios y percepción de diferentes actores de este entorno, así como agentes sociales involucrados con experiencias de conservación.

Durante las últimas décadas, los glaciares alrededor del mundo han experimentado una reducción en su volumen (Bahr y Peckham, 1997; Basantes, 2010; Condom y col., 2011; Favier y col., 2008; Hugonnet y col., 2021). El retroceso glaciar es definido por Johansen y col. (2019) como la incapacidad de almacenar agua durante los periodos más fríos y liberarlos en forma de líquido de deshielo durante la estación seca. El 99% de los glaciares tropicales del mundo están ubicados en los Andes (Condom y col., 2011), los mismos que han experimentado un balance de masa negativo de $0,42 \pm 0,24$ m/año (Dussaillant y col., 2019) y se tiene evidencia con imágenes satelitales y aerofotografía (Basantes, 2010; Condom y col., 2011). Éste acelerado retroceso ha causado preocupación a nivel mundial respecto a la disponibilidad de los recursos hídricos, como una consecuencia de la variabilidad climática (French y col., 2016).

Considerando el efecto que tendría el cambio climático, existe una necesidad de generar conciencia en las poblaciones cercanas a glaciares sobre los cambios en los patrones climáticos y sus consecuencias socio ambientales, ya que de esta manera, como lo propone Rhoades (2008) se puede comprender mejor la urgencia de adoptar estrategias de mitigación y adaptación comunitarias que involucren y favorezcan a los agricultores locales frente a los nuevos escenarios climáticos (Pacheco-Peña, Quinga y Moretta, 2023), tomando en cuenta la necesidad de conservar los páramos como un ecosistema sensible al retroceso glaciar, tal como lo señala (Cabrera y Romero, 2013), en su evaluación cualitativa de la vulnerabilidad al cambio climático de los principales ecosistemas del Distrito Metropolitano de Quito.

Los cambios en el volumen en los glaciares tropicales están sujetos a las condiciones atmosféricas (Favier y col., 2008; Sicart, Hock y Six, 2008), condiciones morfológicas del glaciar y condiciones topográficas (Vuille, 2013). La precipitación se almacena como nieve y hielo, contribuyendo a la acumulación de masa del glaciar (Favier y col., 2008). El derretimiento está controlado por la variación de los flujos de energía de la atmósfera, como el flujo turbulento influenciado por el gradiente de temperatura entre el aire y el hielo, y el flujo latente influenciado por la humedad (Sicart, Hock y Six, 2008). Se ha visto también que existe una correlación entre la temperatura y la fusión en los glaciares (Sicart, Hock y Six, 2008). En el caso de la existencia de un retroceso sostenido de un glaciar, la característica principal de este fenómeno es la fusión de las enor-

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

mes masas de hielo sin que exista la posibilidad de regenerarse (Sandoval, 2021). Para analizar este fenómeno en los glaciares tropicales, Ramírez (2008) menciona entre sus principales causas las variaciones de los patrones climáticos como precipitación y temperatura, puesto que, si no coinciden temporalmente precipitaciones y bajas temperaturas, no se puede formar nieve permanente que renueve y mantenga los ciclos de regulación hídrica asociados con los glaciares. Sin embargo, este es un fenómeno complejo multivariable, que no es controlado únicamente por la cantidad de precipitaciones y la temperatura, pues influirán también factores como el albedo, la orientación, pendiente, entre otros. Por ejemplo, el depósito de cenizas sobre el glaciar causado por erupciones volcánicas puede cambiar el coeficiente de albedo, alterando el balance de energía (Salcedo, 2019).

Se han desarrollado diversos modelos para simular la variación de volumen en los glaciares. El modelo ITGG-2.0 propuesto por Juen (2006), se fundamenta en un perfil vertical de masas, donde se calcula el cambio de densidad en función de la altitud. En este modelo, la variación de energía respecto a la altitud se basa únicamente en los gradientes de albedo y temperatura. Además, se realiza un balance energético completo que incluye la estimación de los flujos turbulentos latentes y sensibles. Por otro lado, el modelo WEAP propuesto por Condom y col. (2011) es más amplio. A diferencia del modelo anterior, no emplea un balance energético completo que considera todos los procesos de los glaciares, lo cual requiere datos detallados y cálculos complicados. En su lugar, el modelo divide el área de la cuenca en franjas de altura, algunas sin glaciar, otras con y sin glaciar, y otras completamente con glaciar. El volumen total se determina a partir de las interacciones entre estas franjas. Un modelo más general es el modelo ICE-KISS propuesto por Pouget (2011). Este modelo considera una división dinámica de los glaciares basada en un límite de temperatura en las zonas de acumulación y ablación. De esta manera, se tienen en cuenta la sublimación y otras variables explicativas. El modelo utiliza una separación de áreas del glaciar en zona de acumulación y zona de ablación (la cual se subdivide en alta y baja), siendo la diferencia principal la temperatura. En el país se han propuesto varios modelos empíricos y físicos que han abordado el pasado y futuro de los glaciares en función del clima y las condiciones morfológicas donde está emplazado el glaciar. Existen varios modelos para evaluar el estado de la lengua glaciar 15 del Antisana (Cáceres y col., 2006; Basantes-Serrano y col., 2016) y 12 del Antisana (Gualco y col., 2022) y un modelo de dinámica glaciar para evaluar el estado de todo el casquete. (Domínguez y col., 2012), propuso un modelo para el glaciar 15 del Antisana.

En esta investigación se pretende caracterizar el retroceso del glaciar del Carihuairazo por medio del uso de un modelo hidroglaciológico, de un registro fotográfico y del análisis de la influencia de factores climáticos y factores externos. Adicionalmente, se pretende analizar las problemáticas derivadas del retroceso glaciar del Carihuairazo considerando la percepción de andinistas y a otros agentes sociales que viven, frecuentan o trabajan en esta zona. En este sentido, se pretende confrontar la información científica que valida la pérdida física del glaciar gracias a los trabajos hidrológicos y glaciológicos, con la percepción de algunos habitantes y otros actores sociales que trabajan en la zona.

2 Materiales y métodos

2.1 Superficies glaciares

El área donde realizamos esta investigación corresponde al volcán Carihuairazo y a la comunidad Cunucyacu (Figura 1), perteneciente a la parroquia Pilahuín. Esta comunidad está asentada a una altura de 4057 m.s.n.m y a 9,25 km del volcán Carihuairazo. El Carihuairazo se ubica geográficamente en las coordenadas 1°2425S 78°4500O y alcanza una elevación de 5018 m s. n. m. Es un estratovolcán que colapsó hacia el WNW (West-North West), situado a 10 km al Noroeste del volcán Chimborazo y a 35 km del volcán Tungurahua. Se desconoce la fecha de su última erupción, no obstante, Clapperton (1990) señala que pudo ocurrir hace once mil años. De los páramos del Carihuairazo nacen ríos (Figura 1) que van a regar zonas áridas de las provincias de Tungurahua y Chimborazo. Aquí se origina el río Blanco, que aguas abajo se unirá al río Colorado o Pucuyacu, que descendiendo por los arenales del Chimborazo formarán el río Ambato (Moreno, 2023).

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

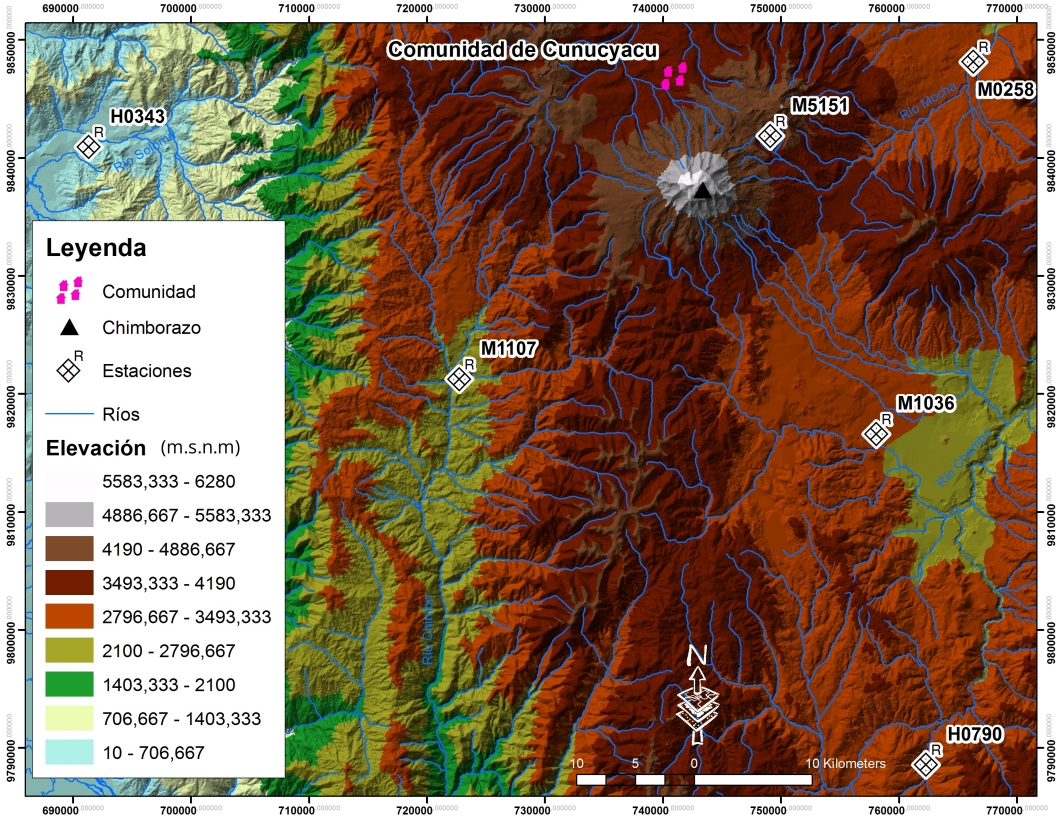

Figura 1. Mapa del área de estudio correspondiente al glaciar del Carihuairazo, la ubicación de la comunidad de Cunucyacu y el drenaje de las fuentes hídricas en la comunidad de Cunucyacu. Adicionalmente, se identifica la ubicación de las estaciones meteorológicas más cercanas al glaciar.
Fuente: Modelo Digital del Terreno (MDT) de Ecuador. Catálogo de metadatos de Sigtierras.

2.2 Meteorología

Para caracterizar el retroceso glaciar del Carihuairazo y conocer la percepción de la comunidad de Cunucyacu ante su extinción hemos utilizando una metodología de múltiples fuentes como lo hiciera Rhoades (2008), en su estudio sobre la desaparición del glaciar del Cotacachi, que incluyen: fotografías repetitivas, datos de estaciones meteorológicas, entrevistas a miembros de la comunidad de Cunucyacu y a andinistas que trabajan y frecuentan la zona, entrevistas a actores sociales con experiencias de conservación de páramos desde la década de 1970. En este estudio hemos recopilado distintas mediciones del glaciar desde 1956, considerando los trabajos previos de Cáceres y Cauvy (2015). Este contorno glaciar fue la referencia para comparar el porcentaje de pérdida hasta la actualidad. Para complementar esta información, se compiló también un registro fotográfico de la montaña desde la década de 1950. Contamos también con datos meteorológicos provistos por las estaciones del INAMHI (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología) más cercanas a las zonas de estudio. Finalmente, para contrastar la información meteorológica con la percepción de la población involucrada tal como lo hiciera La Frenierre y Mark (2017), en su estudio de la desglaciación del Chimborazo, realizamos también entrevistas a los dirigentes de la comunidad de Cunucyacu, andinistas que frecuentan la zona y a agentes sociales involucrados con experiencias de conservación. De igual forma, nos interesamos por relacionar las variables climáticas con la actividad volcánica del Tungurahua y su influencia en la evolución del glaciar del Carihuairazo.

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

2.2.1 Datos glaciológicos

El dato más antiguo que se conoce es la superficie del glaciar del Carihuairazo en 1956, la que entonces alcanzaba una superficie de $0{,}34 km^2$, a partir de allí consideramos las mediciones del contorno glaciar realizadas por Cáceres y Cauvy (2015) y Villacis (2008) y Rosero y col. (2021). Además, se realizó una medición actualizada para contrastar con las mediciones disponibles desde que comenzó a monitorearse en el año 2003. En los datos de áreas disponibles existe un vacío de información entre el año 2010 al 2015.

2.2.2 Datos climáticos e instrumentación meteorológica *in situ*

Los datos meteorológicos fueron suministrados por estaciones pertenecientes al INAMHI (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología). Se usó como referencia para el estudio del glaciar la estación "Glaciar 11 Chimborazo" (M5151) ubicada en el flanco suroeste del Carihuarizo a una distancia de 1 km y a una altitud de 4428 m.s.n.m. Para el tratamiento de datos de temperatura se usó la estación "Querochaca" (M0258) ubicada en el cantón Cevallos a una altitud de 2865 m.s.n.m. Los datos de precipitación se obtuvieron de las estaciones M0258, M1107 (Laguacoto) y M1036 (Politécnica Riobamba) a una distancia de 18, 35 y 28 km de la estación M5151, respectivamente. El proceso de validación y relleno de datos para la estación de referencia incluyó pruebas de homogeneidad, regresión lineal y regresión ortogonal, utilizando como ponderación la distancia (Guijarrom, 2023).

Para poder correr el modelo desde el año en donde se tiene el primer registro de su superficie (1956), se utilizaron los datos de la quinta generación de reanálisis ERA5 (Hersbach y col., 2020) desde 1956 hasta 2022. Esta información fue calibrada a los datos observados de la estación de referencia por medio de un desescalamiento estadístico a partir de la calibración de la distribución de probabilidad acumulada de la variable respecto a una distribución gamma. A partir de la calibración se estimó el error correspondiente a los datos del reanálisis.

Los datos de humedad relativa y de velocidad del viento son escasos en estas cuatro estaciones (sobre todo para los años anteriores al 2010), por tal razón se usó los datos del reanálisis ERA5 con su respectivo error (Hersbach y col., 2020).

2.2.3 Actividad volcánica del Tungurahua

El volcán Tungurahua está ubicado a 35 km del Carihuairazo, su actividad volcánica reciente afectó con deposición de ceniza sobre los glaciares del Carihuairazo y su vecino Chimborazo. La superficie opaca producida por la capa de ceniza puede afectar los valores del albedo de las masas de hielo, contribuyendo al proceso de derretimiento.

El proceso eruptivo del Tungurahua comenzó en 1999 y continuó hasta el año 2016. De acuerdo con los reportes de (Instituto Geofísico de la Politécnica Nacional, 2015) de la Escuela Politécnica Nacional y del diario (El Comercio, 2009; El Comercio, 2016). Durante más de 16 años, el proceso eruptivo del volcán Tugurahua fue permanente y afectó a varias zonas de la región centro del Ecuador, de manera especial a las provincias de Chimborazo y Tungurahua principalmente por la continua emisión de ceniza que perjudicó a la agricultura, ganadería e incluso implicó en algún momento la evacuación de poblaciones aledañas.

2.3 Modelo hidroglaciológico

El modelo hidroglaciológico utilizado para simular la variación del volumen del glaciar del Carihuairazo es una simplificación del modelo realizado por (Piedra Santillan, 2021) en el Antisana. El modelo calcula la variación del volumen del glaciar mensualmente a partir de un balance de energía que se realiza con perfiles verticales de la variación de la masa a diferentes altitudes. A diferencia de otros modelos más complejos en donde se considera una cuenca hidrográfica con una superficie glaciar y se estima el caudal producido por el conjunto glaciar y no glaciar (Fernádez, 2018; Piedra Santillan, 2021), este modelo se limita al glaciar. Para la aplicación del modelo se considera una división dinámica del glaciar que depende de un límite de temperatura en la zona de acumulación y ablación. La línea de altura de equilibrio (LAE) representa la altura que separa ambas zonas (Juen, 2006).

2.3.1 Variación del volumen glaciar

El modelo se aplica a una escala temporal anual (i) y mensual (j). La relación entre el volumen y

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

el área del glaciar está dada por la ecuación (Bahr y Peckham, 1997):

$$Ag_i = \left(\frac{Vg_i}{c}\right)^{1/b} \quad (1)$$

Donde Ag es el área del glaciar, Vg es el volumen del glaciar y b, c son constantes de calibración (sección 2.3.5). La variación del volumen del glaciar (ΔVg) para un año dado viene dado por:

$$\Delta Vg_i = (\Delta Vab_i + \Delta Vac_i)\frac{\rho_a}{\rho_h} \quad (2)$$

Donde ΔVab es la variación del volumen en la zona de ablación, ΔVac es la variación del volumen en la zona de acumulación, ρ_a y ρ_h corresponden a la densidad del agua y del hielo, respectivamente.

2.3.2 Zona de ablación

La zona de ablación se divide en dos 2 zonas con contribuciones distintas, la zona alta (↑) y baja (↓). La delimitación de las zonas se explica en la sección 2.3.4. La variación en la zona de ablación se estima a partir de la suma mensual en un año, del volumen de precipitación total (Vp_{ab}), de derretimiento (V_{der}) y de la sublimación (V_{sub}):

$$\Delta Vab_i = \sum_{j=1}^{12} (Vp_{abj} - V_{derj} - V_{subj}) \quad (3)$$

El volumen de precipitación y sublimación se estima a partir de multiplicar el área de la zona de ablación por la altura de precipitación y sublimación, respectivamente. Cabe recalcar que estos términos se calculan de manera separada para usarlos en la ecuación 3. La sublimación mensual se estimó con una relación empírica, considerando el flujo turbulento de calor latente que depende principalmente de la velocidad del viento y la humedad (Francou y col., 2004):

$$Sn_j = a * u_j * (q_j - qs_j) \quad (4)$$

Donde a es una constante para la homogeneidad de la ecuación, u es la velocidad media mensual del viento en m/s, q es la humedad específica y qs es la humedad específica para la superficie de hielo o nieve en condiciones de fusión en cada mes. El cálculo de la humedad específica se realiza a partir de la metodología propuesta por Pouyaud, Francou y Ribstein (1995).

Para el caso del volumen de derretimiento su estimación es la suma del volumen de derretimiento en la zona de ablación alta y baja:

$$V_{der}\uparrow\downarrow_j = F_j * M_{ab}\uparrow\downarrow_j * A_{ab}\uparrow\downarrow_j \quad (5)$$

Donde F es un factor de corrección que depende de la variación de la radiación incidente por la posición geográfica, azimuth y la pendiente, $M_{ab}\uparrow\downarrow$ es la fusión en la zona de ablación alta y baja, y $A_{ab}\uparrow\downarrow$ es el área de ablación alta y baja. Para el caso del glaciar Carihuairazo, a partir del análisis de la distribución de pendientes y de la altimetría de la montaña, se ha estimado una pendiente constante de 25° y un azimuth de 270°. El factor de corrección es estimado como la radiación incidente mensual para la radiación incidente media, sin considerar la nubosidad debido a que no se dispone de datos. La fusión se calcula en función de la temperatura, en donde solamente existirá fusión si es que la temperatura en la zona es mayor a la temperatura límite de fusión:

$$M_{ab}\uparrow\downarrow_j = max\{0(a_h\uparrow\downarrow)(T_{ab}\uparrow\downarrow_j - T_{lim}\uparrow\downarrow)\} \quad (6)$$

Donde a_h es la constante de derretimiento, T_{ab} es la temperatura y T_{lim} es la temperatura límite, en la zona de ablación alta y baja, respectivamente. Las constantes de derretimiento de cada zona fueron calibradas (sección 2.3.5). El valor de la temperatura límite $T_{lim}\uparrow$ (separa la zona de ablación de la zona de acumulación) usado ha sido de $-1°C$ y para $T_{lim}\downarrow$ (separa la zona de ablación en alta y baja) de $0,5°C$ (Favier y col., 2004; Francou y col., 2004; Pouget y col., 2017). De acuerdo con Favier y col. (2004), estos umbrales representan la mejor correlación entre valores diarios de nieve acumulada y la variación del albedo para el caso del Antisana. Para el caso mensual, el umbral de temperatura separa la precipitación en estado líquido y en estado sólido (Francou y col., 2004).

2.3.3 Zona de acumulación

La variación del volumen en la zona de acumulación se estima a partir de la diferencia entre la precipitación y la sublimación, ya que en esta zona no existe derretimiento. La ecuación es la siguiente, donde S_{ac} es la sublimación en la zona de acumulación y Aac es el área de la zona de acumulación.

$$\Delta V_{acumi} = \sum_{j=1}^{12} (P_j - S_{acj}) * Aac_j \quad (7)$$

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

2.3.4 Alturas límite, áreas y temperaturas

Las alturas límite son variables importantes que permiten hacer la división dinámica del glaciar en las tres zonas (acumulación, ablación alta y baja). La altura límite superior (separa la zona de acumulación y ablación) y la altura límite inferior (separa la zona de ablación superior e inferior) se estiman con:

$$H_{lim}\uparrow\downarrow_j = \frac{T_{lim}\uparrow\downarrow - T_{ref\,j}}{\Delta T} + H_{ref} \quad (8)$$

Donde T_{ref} es la temperatura del aire en la estación de referencia, Href es la altitud de la estación de referencia y ΔT es el gradiente de temperatura respecto de la altitud, el cual se asocia con variaciones en la circulación atmosférica y disponibilidad de humedad relativa (Villacis, 2008). Este gradiente está en el orden de -0,77°C,100 m^{-1} a -0,31°C,100 m^{-1} para los niveles de 500 y 600 hPa (Villacis, 2008). El gradiente de temperatura usado en el modelo fue de -0,34°C,100 m^{-1}, obtenido a partir de las estaciones y ajustado al glaciar. Este valor es similar a -0,35°C,100 m^{-1} usado por Pouget (2011) en la cuenca del Paute (Ecuador).

Usando la evidencia de las imágenes del contorno del glaciar con la altura límite de la extensión, el área de las diferentes zonas del glaciar fue estimada a partir de una función polinómica respecto a la elevación. Usando la ecuación se determina el área de la zona acumulación directamente (Aac) y el área hasta la separación de la zona de ablación alta y baja (Aacab). En donde las áreas de la zona de ablación alta y baja se determinan con:

$$Aab\uparrow_j = Aacab\uparrow_j - Aac_j \quad (9)$$

$$Aab\downarrow_j = Ag_i - Aacab\uparrow_j \quad (10)$$

Finalmente, la temperatura en la zona de ablación alta y baja para el cálculo de la fusión se calcula estimando una altura media en cada zona y usando una función polinómica que relaciona la temperatura respecto a la elevación.

2.3.5 Calibración de los parámetros del modelo glaciológico y estimación de incertidumbre

El modelo glaciológico requiere de cuatro parámetros para su calibración (a, b, $a_h\uparrow$, $a_h\downarrow$). Tanto los parámetros de la relación área-volumen del glaciar, como las constantes de derretimiento de cada zona fueron calibradas usando como función objetiva el estimador Nash-Sutcliffe entre las observaciones anuales disponibles del área del glaciar y la simulación del modelo a partir de un método de optimización de segundo orden de Newton (Byrd y col., 1995). Para la calibración se utilizó las series meteorológicas calibradas del reanálisis y los valores observados en la estación de referencia. A estos parámetros se les llama parámetros de referencia del modelo.

Para la estimación de la incertidumbre respecto al área anual del modelo glaciológico se realizó el siguiente procedimiento. Primero, se generaron 10000 series de datos mensuales de cada variable meteorológica de entrada de manera aleatoria. Para cada variable y en cada mes, el valor fue generado aleatoriamente siguiendo una distribución normal con media igual al valor calibrado del reanálisis o el valor observado de la variable y con una desviación estándar correspondiente al error entre los valores calibrados del reanálisis y los valores observados de la estación de referencia. Para cada set de series generadas, se realizó la calibración de los parámetros del modelo glaciológico. Posteriormente, se corrió el modelo con las series calibradas del reanálisis y se utilizaron todos los sets de parámetros calibrados (10000) para evidenciar la influencia de los parámetros calibrados en el modelo. Finalmente, se realizaron nuevamente las 10000 corridas del modelo con los diferentes sets de series meteorológicas utilizando los parámetros de referencia. En este sentido, se pretendió evaluar el efecto de la incertidumbre de los datos de entrada del modelo.

2.4 Percepción de la comunidad

El presente estudio confronta la información científica que valida la pérdida física del glaciar gracias a los trabajos hidrológicos y glaciológicos con la percepción de las comunidades de la zona. Para ello recurrimos a entrevistas semiestructuradas dirigidas a dos miembros de la dirigencia de la comunidad de Cunucyacu; participamos de una asamblea general de toda la comunidad, entrevistamos a ocho guías y andinistas que visitan con frecuencia esta montaña, de esta manera registramos y comparamos sus observaciones y percepciones sobre el retroceso del glaciar del Carihuairazo en los últimos treinta años. Entrevistamos además a siete actores socio ambien-

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

tales relacionados con el cuidado del páramo que ampliaron la mirada de esta situación y sus implicaciones.

La comunidad nos recibió en su asamblea general, realizada el 11 de septiembre del 2020. En ella los 56 participantes de esta reunión expresaron que su mayor preocupación respecto a este fenómeno se circunscribe a una posible disminución de visitantes al lugar, por otra parte consideran que desde el tiempo de sus abuelos nunca les faltó agua, y aunque el retroceso del glaciar les resulta evidente, confían en que la pérdida del glaciar del Carihuairazo no les afectará significativamente, y no tendrían ningún inconveniente en el futuro, asociado con la gestión del agua en la zona. El cambio climático y sus consecuencias no son un problema relevante en sus discusiones.

Se realizaron también entrevistas a varios miembros de la comunidad de Cunucyacu, el Sr. Luis Punina, guía comunitario de Cunucyacu, realizada el 01 de septiembre de 2020. A los cinco miembros de la directiva de la comunidad el 11 de septiembre del 2020. Al Señor Segundo Enrique Punina, Presidente del cabildo de la comunidad de Cunucyacu, el 16 de Septiembre de 2020. Tanto los miembros de comunidad como los ocho andinistas entrevistados coinciden en el dramático retroceso glaciar en el Carihuairazo. Sus preocupaciones y motivaciones pueden ser distintas, pero nos remiten al mismo origen del problema, la pérdida de la masa de hielo, que deja un serio traumatismo en su percepción de este ambiente. Cada vez menos turistas, más peligros en las rutas de ascenso, menos disponibilidad de agua, y la incertidumbre por un futuro sin glaciares en los Andes.

3 Resultados y discusión

3.1 Resultados

3.1.1 Series de precipitación y temperatura

Se determinó una buena correlación entre las estaciones meteorológicas usadas en el estudio. El coeficiente de correlación alcanzó un valor de 0,67 y 0,82 para la precipitación y temperatura mensual, respectivamente. A partir del proceso de validación y relleno de datos con las estaciones meteorológicas se definió la serie de precipitación en la estación de referencia desde el año 2002 al 2017. Para el caso de la temperatura, la serie se definió desde el año 1995 al 2012 (Figura 2). Respecto a la calibración con los datos del reanálisis del ERA5, el desescalamiento estadístico produjo una serie reconstruida desde el año 1956 hasta el 2022 para la precipitación y la temperatura del aire (Figura 2). El coeficiente de correlación entre la serie calibrada del reanálisis y la estación de referencia fue de 0,59 y 0,74 para la precipitación y temperatura, respectivamente.

3.1.2 Condiciones climáticas en el glaciar

En la Figura 3 se puede ver la variación anual de la precipitación y temperatura en la zona de estudio. La precipitación varía entre 458 y 1281 mm y la media es de 770 mm. No se puede apreciar una tendencia en la variación temporal de la precipitación (factor de variación porcentual positivo del 3%). Los años más húmedos corresponden al 1983, 1984, 1994, 1998, 2008 y 2017. Por el contrario, los años más secos son 1961, 1962, 1986, 2003, 2009 y 2013. Respecto a la temperatura, el valor medio es de $0,7^{\circ}$ y oscila entre $-0,3$ y $1,7°C$. A diferencia de la precipitación, la temperatura tiene una clara tendencia positiva (factor de variación porcentual del 137%). A excepción del año 1998, los años más cálidos se encuentran a partir del 2013.

3.1.3 Límite glaciar entre 1956 y 2021

Apenas se cuenta con 12 registros de contornos del glaciar Carihuarizo entre 1956 y 2021 (Figura 4). Los registros se basan en fotografías aéreas y mediciones topográficas, sobre todo a partir del año 2003. Solamente se tiene un registro anterior (1956). Se ha identificado una tendencia a la disminución de la superficie del glaciar a partir de la primera estimación correspondiente al año de 1956. Esta superficie será considerada referencial para próximas estimaciones del contorno del glaciar tanto para los registros fotográficos como para las salidas del modelo. Para el año 2003, el glaciar ya había perdido un 30% con respecto a la superficie de referencia.

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

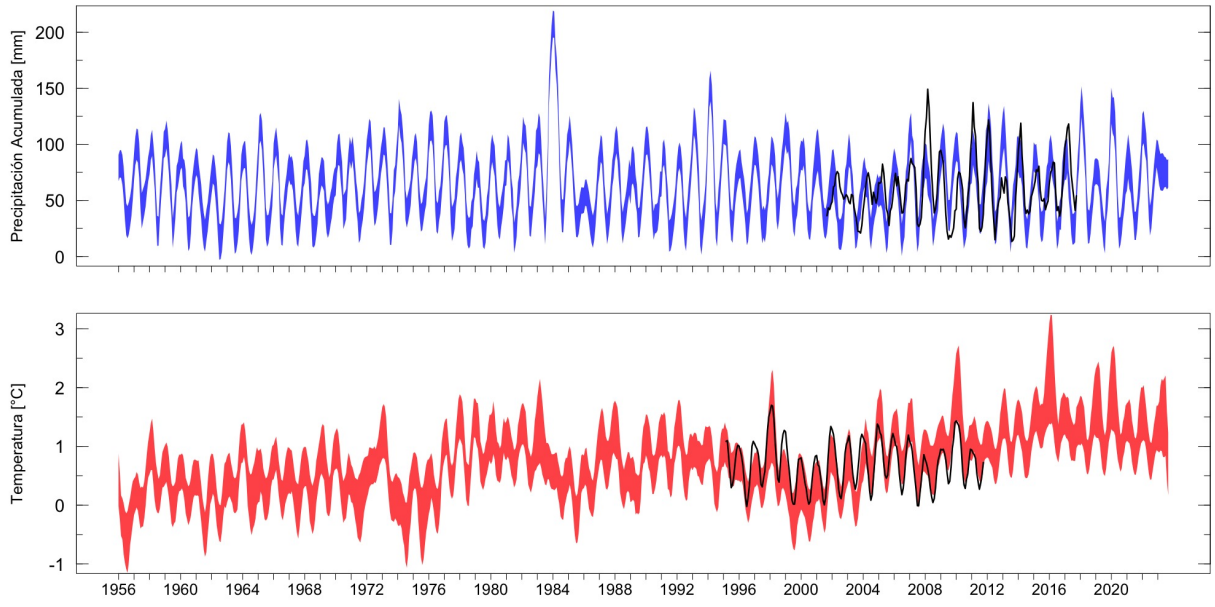

Figura 2. Precipitación (superficie azul) y temperatura media (superficie roja) mensual para un intervalo de confianza del 95 % en la zona cercana al glaciar Carihuairazo después de calibrar los datos del reanálisis ERA5 con las observaciones de la estación de referencia (línea negra) dentro del periodo de 1956 a 2022.

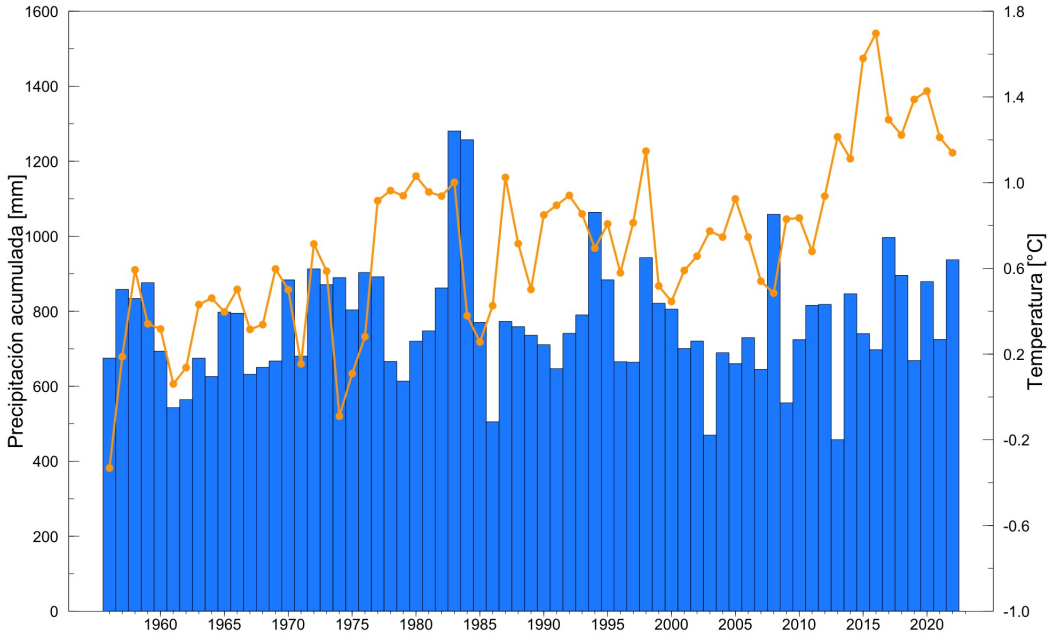

Figura 3. Precipitación acumulada (barras azules) y temperatura media (línea naranja) anual en la zona cercana al glaciar Carihuairazo en el periodo de 1956 a 2022 obtenido de la calibración de los datos de reanálisis ERA5 con la estación de referencia.

Lamentablemente, existe un vacío de información entre 1956 y el año 2003, por lo que no se puede apreciar si es que existieron periodos de recuperación del glaciar. Para el año 2015, ya registraba una pérdida del 90 % comparado con el año 1956. En el año 2017 y 2021, la pérdida glaciar alcanza el 96 % y

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

99 %, respectivamente.

Gracias al archivo fotográfico del reconocido andinista Marco Cruz, se elaboró la Figura 5, en la que evidenciamos la secuencia temporal del retroceso glaciar en el Carihuairazo. De acuerdo con la definición de CECS (2009), un glaciar es una masa de hielo de al menos 0,1 km^2 de extensión. Si consideramos que en el 2017 el área medida es de 0,015 km^2, confirmamos que la masa de hielo remanente ya no puede ser considerada como un glaciar.

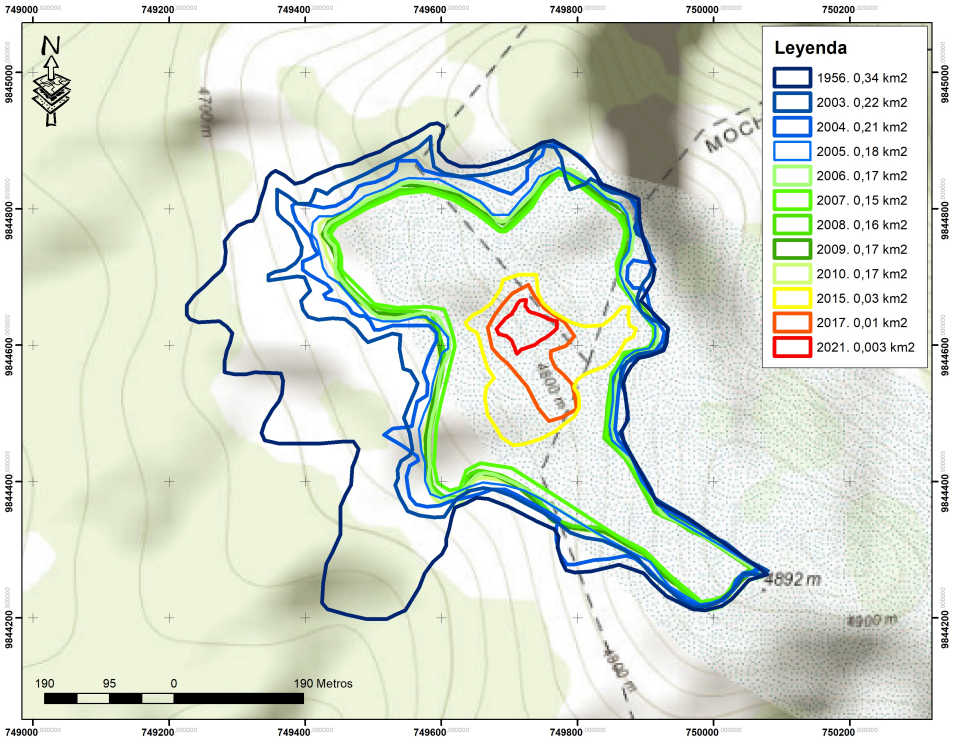

Figura 4. Mapa del área de estudio que muestra la evolución del retroceso glaciar del Carihuairazo. Los contornos de la superficie glaciar fueron medidos por primera vez en 1956 a través de fotografías aéreas. Existen distintas mediciones topográficas de campo a partir de 2003 hasta 2021, a cargo de diferentes equipos de investigación, que revelan la disminución de esta masa de hielo. El contorno externo azul muestra la superficie considerada como referencial registrada en 1956. Por otra parte, el polígono rojo ilustra la última medición de campo realizada en 2021. Fuente: Adaptación de Cáceres y Cauvy (2015) y de Rosero y col. (2021).

3.2 Modelación del glaciar del Carihuairazo

El modelo fue corrido desde el año 1956 hasta el 2022 y sus resultados se pueden observar en la Figura 6. El modelo muestra la recuperación del área del glaciar desde 1956 hasta 1963, seguido por un periodo de estancamiento de varios años para posteriormente tener un incremento importante entre 1973 y 1976. A partir de este año, se muestra un retroceso continuo del glaciar a lo largo del tiempo, con escasos periodos de recuperación. Se puede observar que el modelo simula satisfactoriamente la evolución del área del glaciar hasta el año 2010. El modelo capta bien la tendencia decreciente general y las variaciones en el área, inclusive la recuperación de la masa del glaciar en el año 2008. Para este periodo, el estimador de Nash-Sutcliffe (nse) es de 0,82 y el error cuadrático medio (rmse) es de 0,01 km^2. Sin embargo, el modelo no logra simular correctamente el área del glaciar en los años 2015, 2017 y 2021. Considerando todo el periodo, el nse y el rmse alcanzan un valor de 0,77 y 0,03 km^2, respectivamente.

La incertidumbre asociada a las variables de en-

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

trada y a los parámetros del modelo están representadas en la Figura 6. El rango más pequeño corresponde a 10000 simulaciones del modelo con cambios en las variables de entrada, utilizando los parámetros de referencia calibrados del modelo (Tabla 1). En este caso se puede ver que la banda incrementa su tamaño en relación con los años, y que la mayor incertidumbre se aprecia en las dos últimas décadas. El segundo rango, que tiene mayor amplitud, corresponde a 10000 simulaciones del modelo con parámetros calibrados para cada uno de los 10000 sets de las variables de entrada.

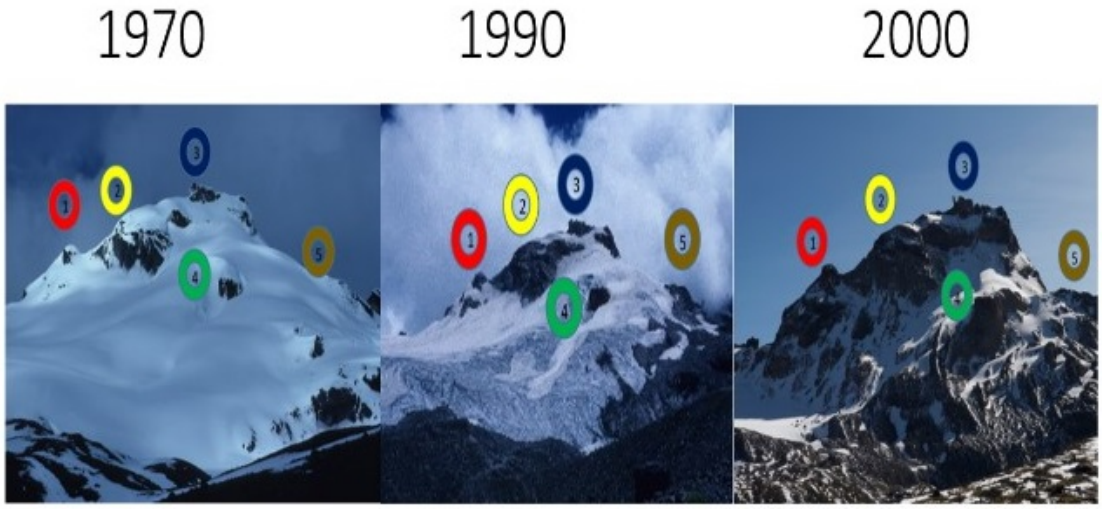

Figura 5. Fotointerpretación. Las imágenes corresponden a la misma perspectiva de la cumbre central del Carihuairazo, desde el flanco sur pertenecientes al archivo de Marco Cruz. Los círculos del mismo color muestran el mismo punto de la montaña y cómo ha variado desde la década de 1970 hasta los primeros años de la década del 2000. En ellas puede apreciarse el cambio producido en la montaña en los cinco puntos de referencia considerados en el transcurso de las últimas décadas del siglo XX. En la actualidad el glaciar lo podemos considerar prácticamente extinto.
Fuente: Archivo personal de Marco Cruz.

En este caso se puede apreciar la mayor incertidumbre en los primeros 25 años y en los últimos 7 años de la simulación. Entre los años 80 hasta el 2010, el rango de incertidumbre es similar al del primer rango. De cualquier forma, independientemente de la combinación, se puede apreciar que el modelo simula claramente la pérdida de masa del glaciar, que aumenta a partir de la segunda parte de los años 80s.

Tabla 1. Parámetros calibrados del modelo hidroglaciológico. El rango corresponde al 95 % de los 10000 valores alrededor de la mediana.

Parámetro	Rango	Valor calibrado
a	0,013 - 0,028	0,014
b	1,27 - 2,01	1,35
$a_h \uparrow$ [mm/mes/°C]	214 - 234	218
$a_h \downarrow$ [mm/mes/°C]	227 - 328	228

El modelo permite estimar las variables de entrada y de salida del glaciar que incrementan y reducen el tamaño del glaciar, respectivamente. En la Figura 7 se puede apreciar estas variables en el periodo de corrida del modelo. La variable predominante es la fusión, siendo la variable más alta en el 58 % del tiempo. La precipitación es la mayor variable en 28 ocasiones, siendo el 69 % antes de 1980 y solamente en una ocasión después del año 2000. La sublimación es baja con relación a las otras variables, oscilando alrededor de 100 mm de altura de agua equivalente. En relación con el balance entre entradas y salidas, existe un déficit en el 61 % del tiempo. Esto explica la pérdida de masa del glaciar que se evidencia en el comportamiento de la variación del área del glaciar, en donde en pocos años se puede observar una recuperación del mismo.

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

3.3 Discusión

3.3.1 Modelo hidroglaciológico e influencia de factores climáticos y externos

El modelo hidroglaciológico se corrió desde el año 1956 correspondiente a la primera medición disponible del glaciar. Para complementar los datos de las variables climáticas se utilizó el producto del reanálisis ERA5. Los datos de reanálisis se han utilizado en otros estudios en la región como el caso del volcán Antisana (Bradley y col., 2009; Manciati y col., 2014; Basantes-Serrano y col., 2022). Manciati y col. (2014) encontró que las variables del reanálisis NCEP-NCAR (Kalnay y col., 1996) combinado con datos de estaciones regionales tienen una buena correlación con la pérdida de masa del glaciar. Basantes-Serrano y col. (2022) utilizó el reanálisis ERA5 para estimar el efecto del clima y la topografía en la variación del volumen del Antisana, en donde se encontró que la serie del reanálisis fue capaz de capturar la estacionalidad de la precipitación y temperatura en el lado occidente del volcán. En este estudio se utilizó el reanálisis ERA5 debido a que presentó una mejor correlación con la estación de referencia para la temperatura respecto al reanálisis NCEP-NCAR.

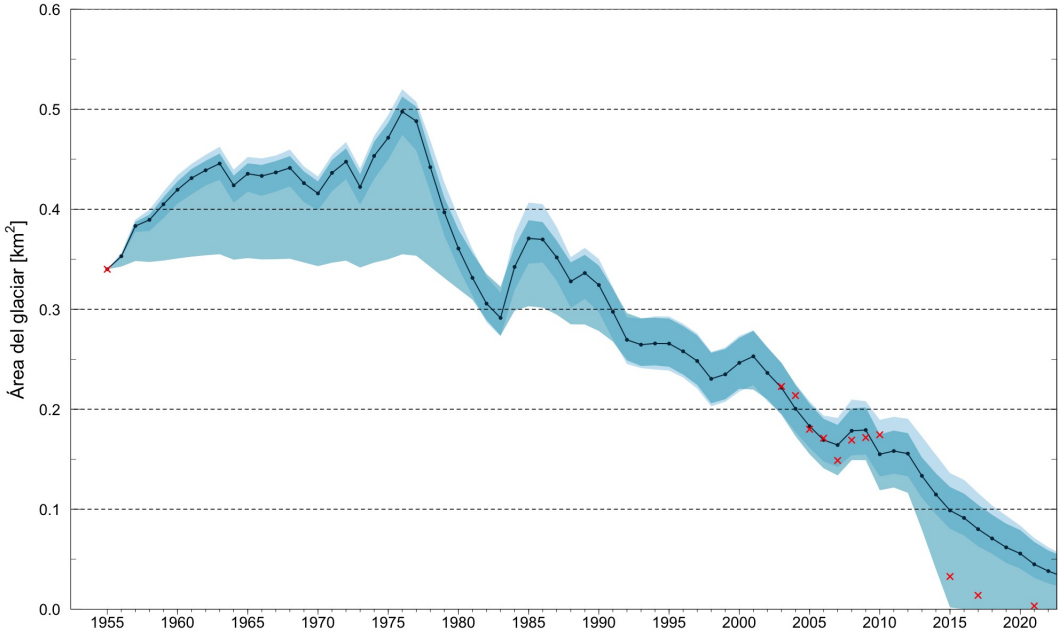

Figura 6. Simulación de la variación del área del Glaciar del Carihuairazo (1956-2022) como producto del modelo hidroglaciológico. Las cruces rojas correspoden a las mediciones observadas de las fotos aéreas (la primera medición de 1956 es representada en el modelo como el valor final del año 1955). La línea continua oscura con puntos representa la simulación del modelo con la serie del reanálisis calibrado. La superficie azul clara representa el 95 % de las 10000 simulaciones realizadas con la variación de las variables de entrada utilizando los parámetros calibrados. La superficie azul oscura representa el 95 % de las 10000 simulaciones realizadas con las variables de entrada del reanálisis calibrado y los diferentes sets de parámetros calibrados para la variación de las variables de entrada. La banda azul más oscura representa la intersección de las bandas anteriormente descritas.

La serie de temperatura reconstituida presenta una clara tendencia positiva que se magnifica más a partir del año 2012. Esta tendencia está en concordancia con resultados obtenidos a nivel global (Hugonnet y col., 2021; Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2022) y regional (Morán-Tejeda y col., 2016; Aguilar-Lome y col., 2019; Imfeld y col., 2021). La temperatura muestra un incremento de $0,14°C$ por década, un valor similar al $0,10°C$ encontrado en los andes de Perú (Seiler, Hutjes y Kabat, 2013) y menor al $0,25°C$ encontrado a nivel del Ecuador (Morán-Tejeda y col., 2016). Para el caso de la precipitación no se encontró una clara tendencia. En un estudio de la tendencia climáti-

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

ca en el Ecuador, Morán-Tejeda y col. (2016) no encontraron una tendencia significativa en la precipitación anual en la región interandina. Periodos húmedos como 1965-1966, 1983-1984, 1993-1994, 1997-1998 y 2008, coinciden con el índice estandarizado de precipitación evapotranspiración positivo encontrado por Vicente-Serrano y col. (2017) en la región interandina. Se puede evidenciar un claro incremento de precipitación en el periodo 1983-1984 que coincide con el fenómeno del Niño extremo en ese periodo. Sin embargo, para el otro periodo de el Niño extremo (1997-1998) no hay un incremento significativo. Este comportamiento coincide con el estudio de extremos secos y húmedos en la ciudad de Quito realizado por Domínguez-Castro, García y Vicente (2018). Años secos como 1961-62, 1967, 1979, 1986, 1991, 2003 y 2009 coinciden con los resultados de Vicente-Serrano y col. (2017) y Domínguez-Castro, García y Vicente (2018).

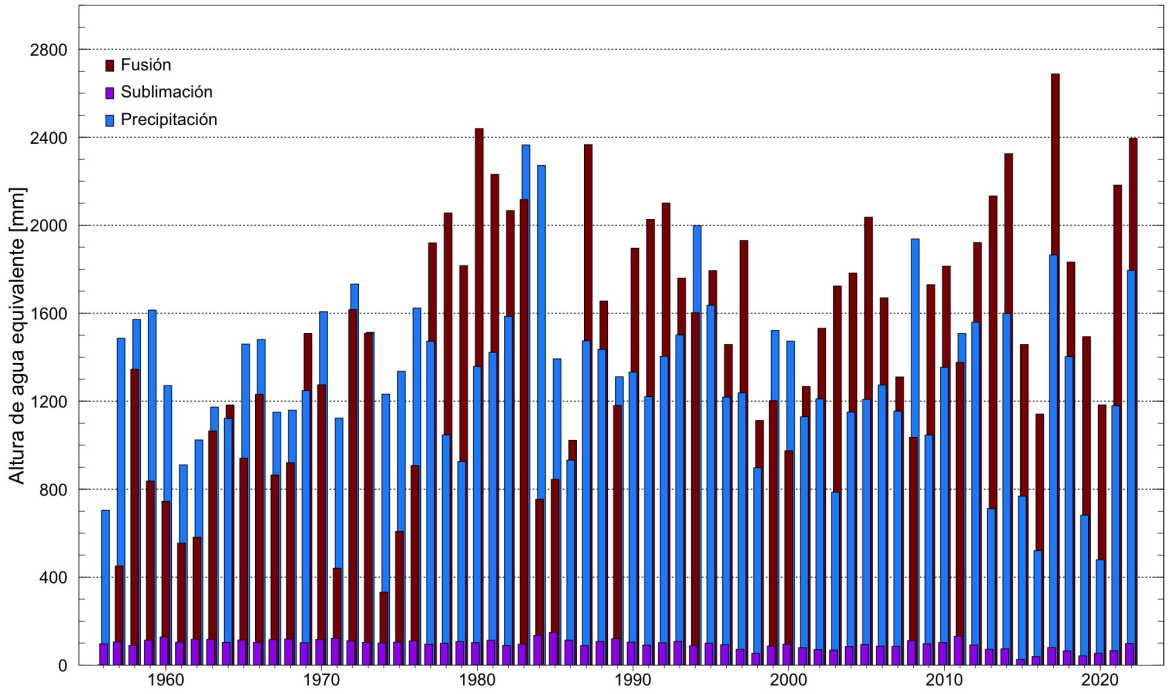

Figura 7. Balance de masas anual en el Glaciar del Carihuairazo (1956-2022). Las barras representan las variables de entrada (precipitación) y salida (fusión y sublimación) que influyen en el balance de masas del glaciar.

Los parámetros calibrados a partir de las observaciones del área del glaciar están dentro de los valores típicos que se evidencian en la bibliografía (Tabla 1). Los parámetros que relacionan el área y el volumen del glaciar (a=0,014 y b=1,35) son similares a los recomendados al estudio de la relación de área-volumen de varios glaciares de Bahr y Peckham (1997), donde se recomienda valores de a=0,048 y b=1,36. Los valores de los parámetros obtenidos de la optimización de 10000 corridas para diferentes variaciones en las variables de entrada revelan una dispersión grande (Tabla 1). Bahr, Pfeffer y Kaser (2015) realizaron una revisión de la relación área-volumen de los glaciares para los parámetros a y b, y se indica que mientras el parámetro a puede ser variable del glaciar en glaciar e incluso puede cambiar en el tiempo, el parámetro b debería ser fijo y su valor debería estar entre 1,167 y 1,5, caso contrario podría causar inconsistencias en las ecuaciones de equilibrio mecánica en glaciares.Grinsted (2013) también encuentra el valor de b dentro de este rango. Sin embargo, Radić, Hock y Oerlemans (2007), en un estudio de la evolución de de 37 glaciares sintéticos, encontraron valores

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

de b de 1,56 para condiciones estacionarias, y valores aún mayores (hasta 2,90) para condiciones no estacionarias, concluyendo que el parámetro b es mayor en escenarios de calentamiento (pérdida de masa del glaciar) y que el mismo tiende a incrementarse con un menor tamaño inicial del glaciar. Este descubrimiento está en concordancia con un estudio de la evolución del pequeño glaciar Chacaltaya en Bolivia (Ramirez y col., 2001), en donde a partir de mediciones topográficas anuales y de estudios geofísicos realizados en el glaciar, se puede estimar el parámetro b de 2,05 en el periodo 1860-1998. En este estudio, en el 39% de los casos el parámetro b se encuentra dentro del intervalo recomendado por Bahr, Pfeffer y Kaser (2015). En el 98% de los casos, b está por debajo de 2,05. Para el caso de las constantes de derretimiento en la zona de ablación alta y baja, los valores calibrados están cercanos a los valores recomendados por Fernández Yánez (2010), de 180 y 240 mm/mes/$^{\circ}C$, respectivamente. Sin embargo, los valores encontrados son menores al rango de 284 a 434 mm/mes/$^{\circ}C$, usado por Caro y col. (2023) en un estudio de la simulación de la pérdida de masa de glaciares en la zona andina tropical.

El desarrollo del modelo permitió estimar la variación en el volumen del glaciar en un periodo de 68 años. El modelo muestra un incremento en la masa del glaciar hasta el año 1975 y posteriormente una pérdida constante de su masa, a excepción de unos pocos años (ej: 1999-2000 y 2007-2008) en donde existe una ligera recuperación como consecuencia de un exceso en las entradas de precipitación o por la disminución en las pérdidas por sublimación y fusión, la última reducida por la reducción de la temperatura en esos años. Esta pérdida acelerada del volumen del glaciar a partir de finales de los años 70 ha sido evidenciada en los glaciares andinos de la zona tropical (Rabatel y col., 2013). También, se ha reportado un decrecimiento significativo en el volumen de los glaciares a nivel mundial desde inicios del siglo 21 que coincide con el incremento del nivel del mar (Hugonnet y col., 2021). En el Ecuador, en un estudio de recesión del glaciar del volcán Cotopaxi (Jordan y col., 2005), se evidenció un comportamiento parecido al encontrado en este estudio, donde en el periodo 1956-1976 el glaciar del Cotopaxi mantuvo su masa, y posteriormente sufrió un retroceso del 30% de su masa hasta 1997. En otro estudio en el glaciar del volcán Antisana (Basantes-Serrano y col., 2022), se puede evidenciar un comportamiento similar, excepto por el periodo 1956-1964 en donde hubo un significativo retroceso del glaciar, y el periodo a partir del año 2000, en donde a pesar de que el glaciar tuvo pérdidas de masa, el retroceso no fue tan significativo como el periodo a finales de los 70 hasta el 2000. Este comportamiento difiere del retroceso del glaciar Carihuairazo, en donde la pérdida de masa es similar entre los 80s y finales del 2010. Para el caso del glaciar del volcán Chimborazo, el más cercano al Carihuairazo, la pérdida del área del glaciar entre 1962 y 1997 fue del 57% (Caceres, 2010), que es similar al 48% que se encontró para este estudio.

A pesar de que el modelo logra simular satisfactoriamente el área del glaciar hasta el año 2010, el mismo no puede reproducir la disminución abrupta que se presenta a partir del 2011. Al observar la precipitación y la temperatura en este periodo, se puede apreciar que la temperatura sufre un incremento considerable entre 2011 al 2016, y posteriormente un ligero decrecimiento (Figura 2). Esta variación en la temperatura se ve reflejada en la disminución del área del glaciar, pero la pérdida de masa no es suficiente como se puede ver en las observaciones. Un factor que podría explicar la diferencia es la relación entre el volumen y el área del glaciar. El modelo utiliza una relación constante independientemente del tamaño del glaciar, pero esta relación puede cambiar sobre todo cuando el área es reducida, ya que la influencia de la topografía de la montaña va a ser más preponderante (por ejemplo, la presencia de protuberancias o depresiones). Este fenómeno podría explicarse por el efecto de borde que Santos y Tellería (2006) define como: "el conjunto de procesos asociados al incremento de la relación perímetro/área que se produce con el avance de la fragmentación". También, se debe considerar que la reducción de la masa del glaciar a un tamaño tan pequeño (menor a 0,1 km^2) puede producir un cambio en el microclima alrededor del glaciar, produciendo un incremento en la temperatura que no se ha podido evidenciar. Por ejemplo, el pequeño glaciar Chacaltaya en Bolivia, que tenía una superficie de 0,25 km^2 al inicio de los años 40, ha sufrido un retroceso hasta la extinción; para inicios del siglo 21, el retroceso significó una salida del suministro de calor para el derretimiento del glaciar de 10 W/m² (Ramirez y col., 2001), equivalente a incremento de 1,5$^{\circ}C$.

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Otro factor que se podría considerar en la simulación del retroceso del glaciar Carihuairazo es la influencia del proceso eruptivo del volcán Tungurahua. Vasconez y col. (2021) determinaron que en noviembre del 2015 se liberaron a la atmósfera 1,83E+06 m^3 de ceniza; de acuerdo a este mismo estudio la dirección promedio del viento durante la erupción fue hacia el oeste, noroeste y suroeste. Esta investigación determinó que la ceniza volcánica acumulada alcanzó <100 g/m^2 en las tierras altas del flanco este del volcán Chimborazo. Debido a la cercanía del Carihuairazo al volcán Tungurahua, las emanaciones de ceniza del volcán fueron depositadas en el glaciar, cubriendo parcialmente la superficie del hielo y de la nieve, causando una reducción en el albedo. Como consecuencia, la capacidad para reflejar la radiación de onda corta en el glaciar pudo haber sido disminuida, favoreciendo a la fusión y la posterior dinámica del retroceso del glaciar. La acumulación de ceniza sobre la superficie glaciar del Chimborazo y del Carihuairazo provenientes de las erupciones del Tungurahua exacerbó el proceso de desglaciación, tal como lo señala Marco Cruz (2020, entrevista personal): "Un albedo alto va a reflejar hasta el 90% de la energía lumínica, por el contrario, la ceniza del Tungurahua redujo el albedo en los glaciares del Chimborazo y del Carihuairazo, de tal manera que hasta el 80% de la energía lumínica era absorbida por el glaciar, lo que ocasionó la formación de grandes campos de penitentes".

La Frenierre y Mark (2017) señala que la disminución del albedo exacerba el efecto del calentamiento de la superficie del glaciar, como se ha observado en el Kilimanjaro, en África Occidental, donde el retroceso glaciar ha sido más sensible a la disminución del albedo, producto de la disminución de nevadas, que al aumento de temperaturas.

La Figura 8 se ha elaborado con la información recopilada en las estaciones meteorológicas, la simulación del modelo, las observaciones del área del glaciar y el registro de la actividad volcánica del Tungurahua, que relaciona para cada año el comportamiento de cada una de estas variables con el fin de establecer una posible conexión entre ellas y el retroceso glaciar del Carihuairazo. En el periodo del 2003 al 2017, se puede observar que la variación en el área del glaciar está relacionada principalmente a la variación de la temperatura tanto en los resultados del modelo como en las observaciones. Por el contrario, la precipitación muestra una relación inversa en varios años. Respecto a la actividad del volcán Tungurahua, se ha intentado realizar una caracterización de su actividad de manera cualitativa. No se puede ver una relación evidente entre la actividad y la variación del área del glaciar, pero la actividad podría explicar ciertas diferencias entre el modelo y las observaciones.

Para el periodo 2008-2009, evidenciamos que pese a existir las condiciones climatológicas favorables para una posible recuperación considerable del glaciar, la coincidencia de este periodo con una de las fases eruptivas más violentas del volcán Tungurahua, verificamos solamente una pequeña recuperación del glaciar del Carihuairazo. Para el periodo 2010-2015, no se aprecia un incremento considerable en la actividad del volcán que pueda explicar la reducción abrupta en área del glaciar. En este sentido, el significativo retroceso en el área estaría más relacionado con el efecto borde en la parte alta del glaciar.

3.3.2 Impactos en los sistemas socioeconómicos, ambientales y culturales

Se ha intentado caracterizar el impacto que ha tenido el retroceso del glaciar en la comunidad de Cunucyacu. Tanto los miembros de comunidad como los andinistas entrevistados coinciden en el dramático retroceso glaciar en el Carihuairazo. Sus preocupaciones y motivaciones pueden ser distintas, pero nos remiten al mismo origen del problema, la pérdida de la masa de hielo deja un trauma cultural en su percepción de este ambiente, más peligros en las rutas de ascenso, menos disponibilidad de agua, y la incertidumbre por un futuro sin glaciares en los andes. Las superficies de páramo son las que aseguran la provisión de agua para las poblaciones en cotas más bajas. De acuerdo con la investigación realizada por Buytaert y col. (2017), se determinó que la contribución glaciar proveniente del Carihuairazo a los caudales de la zona no es representativa, pues esta se encuentra por debajo del 4%. Aunque el retroceso de los glaciares andinos en el Ecuador no implique necesariamente una disminución en la disponibilidad de agua por sí misma, si es un claro indicador de los cambios de condiciones y temperaturas a los que se enfrenta este ecosistema, y revela además una serie de vulnerabilidades asociadas con el cambio climático, como migraciones

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

forzadas en búsqueda de mejores campos de cultivo, búsqueda de nuevas fuentes de agua, mejores pastos, etc.

Para Ana Segovia (2021, entrevista personal) la pérdida del vínculo con la naturaleza, específicamente en la comunidad de Cunucyacu, se debe a las precarias condiciones de vida a las que se enfrentan estas personas. La falta de educación de calidad, las distancias que los niños deben recorrer para llegar a la escuela de la comunidad, por ejemplo, hace que quien pueda permitírselo trate de enviar a sus hijos a estudiar a otro lugar, generando las condiciones de una futura migración. Una consecuencia de este fenómeno es que la agricultura y la ganadería actualmente sean manejadas por adultos mayores. Segovia cree que también se trata de un problema de autoestima, porque se considera que, en este escenario, tener algún tipo de creencia vinculante con las montañas está mal, no es debidamente valorado. Además, está muy presente la percepción general que asocia la vida en estas zonas con pobreza y marginación. Este desarraigo de las comunidades frente al páramo tiene su interpretación en el cambio de la tenencia de la tierra, que para Luis Chicaiza (2021, entrevista personal) es un problema estructural, pues muchas comunidades fueron desplazadas desde las zonas bajas, más productivas, hacia terrenos de altura, menos productivos para la agricultura, lo que los obliga al cambio del uso del suelo en su búsqueda de recursos para su subsistencia.

En opinión de Susana Escandón (2021, entrevista personal), el agua es uno de los elementos alrededor del cual se tejen conflictos, saberes, dinámicas económicas, etc., entonces es importante considerar esta multidimensionalidad del agua a la hora de tomar decisiones integrales al respecto. En este sentido, explica otra forma de entender este proceso de desconexión, debido a la disminución de recursos en estos territorios antes abundantes, y que ahora ya no resultan ser tan visibles o poderosos como antes.

Con base a la entrevista realizada al Sr. Luis Punina, guía local de la comunidad, la mayor preocupación que tienen en torno al retroceso glaciar del Carihuairazo son las consecuencias en el ámbito turístico, por encima incluso de las posibles implicaciones en la disponibilidad de agua para la comunidad. Debido a que tienen la idea de que las visitas al sector únicamente obedecen al interés de acercarse a la montaña nevada, y una vez que el glaciar ha desaparecido, han notado una disminución de turistas. Es importante considerar además que el presente estudio ha coincidido temporalmente con las medidas de confinamiento decretadas en el contexto del COVID-19. En la reunión mantenida con la asamblea de la comunidad el 11 de septiembre de 2020, los comuneros expresaron su confianza en que desde los tiempos de sus abuelos no les faltó el agua, y confían en que no les faltará en el futuro, más allá de si el glaciar del Carihuairazo llegase a desaparecer por completo. Por lo que muestran un completo desinterés por generar planes y acciones que les permitan adaptarse a posibles amenazas. A pesar de ello, ya han comenzado a buscar nuevas fuentes de provisión de agua provenientes de los glaciares del Chimborazo.

El profundo respeto integral a la naturaleza era uno de los valores arraigados en la cosmovisión de las comunidades indígenas alto andinas, pero las nuevas generaciones tienen hoy una nueva forma de entender su entorno, según lo señala Mesías Usigña (2021, entrevista personal). Factores como la religión, despojo de tierras cultivables, migración, cambios en los modos de consumo de las comunidades y sobre todo de las ciudades han generado condiciones de vida inadecuadas en torno a las montañas, la búsqueda de más recursos ha hecho que las personas se separen de sus símbolos y creencias.

La disyuntiva a la que nos enfrentamos como sociedad muestra por un lado la exigencia del cuidado del páramo hacia las comunidades que viven en sus inmediaciones para el beneficio de todas las personas que aguas abajo se benefician de ella, y por el otro lado está la legítima retribución que las urbes le deben a las comunidades por sus acciones de conservación del páramo. Es necesario establecer el vínculo entre lo urbano y lo rural. Comprender el origen del agua que llega a nuestras ciudades, ayudará a visibilizar la necesidad de un trato justo con las comunidades que se encargan de la protección de los páramos. Es importante poner en valor los sistemas de producción campesina familiar, que son los que proveen a las urbes.

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

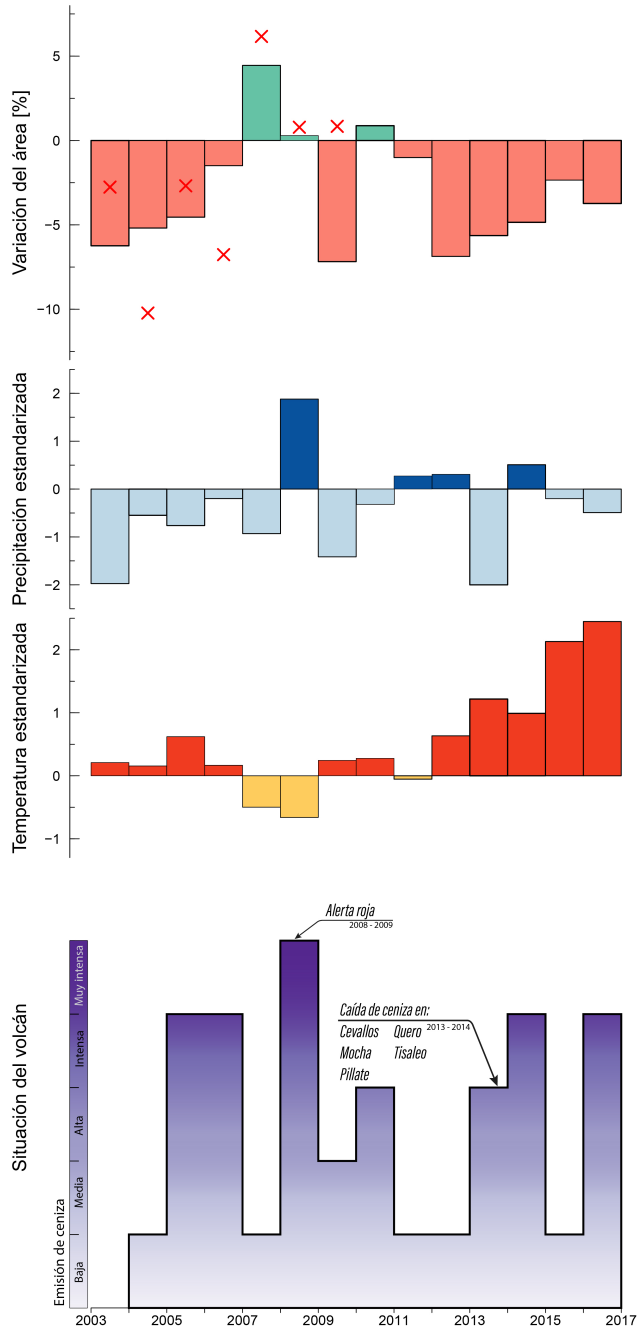

Figura 8. Relación entre la variación de la superficie del glaciar Carihuairazo, la precipitación, temperatura y la actividad volcánica del Tungurahua entre el 2003 y el 2017. En el primer gráfico se observa el incremento o pérdida del área entre cada año en relación con el año 1956 ($0,34\ km^2$). Las barras corresponden a la simulación del modelo hidroglaciológico y las cruces rojas a las mediciones del contorno del glaciar (solo se incluyó años seguidos de observaciones). En el segundo gráfico se observa la precipitación estandarizada en cada año. En el tercer gráfico se observa la temperatura estandarizada en cada año. En el cuarto gráfico se observa la caracterización de la actividad volcánica del Tungurahua con relación a la emisión de cenizas y a eventos puntuales.

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Se debe considerar al agua "como un dinamizador de la organización comunitaria campesina" (Chicaiza 2021, entrevista personal), esta percepción del agua como algo más que solo un recurso, facilitaría el compromiso de conservación de las fuentes desde las ciudades, pueblos y comunidades. Las tensiones provocadas alrededor del páramo revelan cuestiones más profundas de inequidad y marginación que son las que motivan a los procesos de migración en varios aspectos: la tenencia de la tierra, acceso a educación de calidad, acceso a servicios básicos, acceso a agua de la misma calidad que la que llega a las grandes ciudades, etc. Los intentos por frenar el avance de la frontera agrícola, el cuidado del agua que otros usan, son algunos de los muchos rostros de esta crisis. En los últimos diez años, hemos sido capaces de ir generando datos y modelos sobre los posibles escenarios climáticos a los que se podría enfrentar nuestra región; no obstante, esta información no ha llegado a los agricultores y menos a las comunidades que habitan en los páramos, así que una parte de este proceso de sensibilización frente al cambio climático debe estar atravesada por la democratización de la información climática, que les permita entender y adaptarse a los cambios que se evidencian y que tarde o temprano van a afectar sus modos de vida.

Aunque en la actualidad las comunidades indígenas de altura, no discutan específicamente sobre el cambio climático, no significa que sean ajenos a esta realidad, pues para ellos si es perceptible un cambio sustancial en su calendario agrícola. Quizás sus discusiones estén más centradas en aspectos considerados como prioritarios para su subsistencia diaria, y no podrán articular debidamente una agenda de cambio climático mientras sus necesidades más básicas no estén cubiertas.

3.3.3 Necesidades, desafíos y oportunidades de adaptación

El contexto socio-económico de la parroquia Cunucyacu es complejo, pues de sus 12 218 habitantes, el 95% de la población vive bajo condiciones de pobreza, en un ambiente en donde no todos tienen acceso a los servicios básicos, y no alcanzan a cubrir la canasta básica familiar (GAD Parroquía Rural de Pilahuín, 2015). El riego de auxilio a los cultivos que normalmente no son regados podría volverse más importante en el transcurso de los próximos años debido a la variabilidad pluviométrica. Razón por la cual, la infraestructura para riego debería posibilitar este tipo de asistencia, mediante sistemas móviles de aspersión o riego por goteo, y garantizar de este modo la seguridad alimentaria de esta población (Gobierno Provincial de Tungurahua, 2011).

Aún no comprendemos del todo la importancia de los glaciares en los ciclos hidrológicos, y a pesar de ello no contamos con una red de monitoreo y vigilancia del comportamiento glaciar en los andes, esto provoca serias incertidumbres en los intentos de modelización del comportamiento de estas masas de hielo y su futura influencia en la dotación de agua para nuestros campos y ciudades.

3.3.4 Limitaciones de la investigación

En cuanto a la implementación y validación del modelo hidroglaciológico, una de las limitaciones fueron las mediciones disponibles. No existe ninguna estación en el glaciar y las estaciones meteorológicas cercanas son escasas. Además, se debe considerar la incertidumbre de la reconstrucción de las series hacia el pasado a partir del uso del reanálisis ERA5. Por este motivo, existe incertidumbre en las series temporales de las variables meteorológicas de entrada usadas en el modelo que alcanza un error en las estimaciones del área del glaciar de $0,02\ km^2$. Sin embargo, la principal limitante es el escaso número de mediciones que sirvan para validar el modelo, que en este caso son las mediciones del área del glaciar. Lamentablemente entre 1957 y 2000, no existen datos del área del glaciar. El limitado número de mediciones del área del glaciar genera incertidumbre en los valores de los parámetros calibrados del modelo, ya que puede existir el problema de equifinalidad al no existir suficientes restricciones y al incluir la incertidumbre de las variables meteorológicas de entrada. En este sentido, el error promedio en las estimaciones del área alcanza $0,05\ km^2$ y es mayor en las décadas donde no hay observaciones. De todas formas, el modelo logra simular el retroceso del glaciar satisfactoriamente.

Con relación a la percepción de la comunidad respecto al retroceso del glaciar, la mayor limitación que enfrentó esta investigación fue el contexto de las restricciones inherentes a la pandemia de COVID-19 que coincidieron con el tiempo de realización del trabajo de campo. Otra limitante fue la

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

negativa de la comunidad a realizar las encuestas de percepción, luego de las reuniones y acuerdos mantenidos con la dirigencia de la misma. Por ello no fue posible contar con un insumo estadístico, para contrastar con otras experiencias de conservación del páramo, se realizaron entrevistas a diferentes actores que trabajan en tareas de investigación, fondos de agua, dirigencia de organizaciones indígenas, reservas privadas y agencias internacionales, para obtener una visión más amplia de la situación socio ambiental de los páramos en el Ecuador.

4 Conclusiones

A partir de un registro fotográfico, testimonios de la comunidad y mediciones del contorno del glaciar Carihuairazo, es inevitable concluir que el glaciar Carihuarizado ha experimentado un retroceso considerable. Con relación al año 1956, el glaciar ha perdido el 97,1% y 99,1% de su superficie al año 2017 y 2021, respectivamente. El uso de un modelo hidroglaciológico evidencia la pérdida del área del glaciar a partir de finales de los años 70, excepto por algunos años en donde se evidencia una ligera recuperación. El retroceso coincide con la tendencia positiva en el incremento de la temperatura a lo largo de los años, siendo esta variable la que tendría mayor influencia en la reducción del volumen del glaciar. El modelo usado tiene algunas limitaciones y no puede incorporar factores externos como la caída de cenizas del volcán Tungurahua.

Las condiciones climáticas y de altitud a las que esta pequeña masa de hielo está sometida lo colocan en una situación de inevitable extinción. Aunque el retroceso de los glaciares andinos en el Ecuador no implique necesariamente una disminución en la disponibilidad de agua por sí misma, debido a que son principalmente los páramos los que aseguran la provisión de agua para las poblaciones, si es un claro indicador de los cambios de condiciones y temperaturas que enfrenta este ecosistema.

Es necesario insistir en la necesidad de recopilar información meteorológica en las zonas cercanas a los glaciares de los andes ecuatorianos y ajustar modelos que permitan predecir su comportamiento en los próximos años para constituir una base científica que facilite proponer medidas de adaptación.

El retroceso glaciar afectará algunos ámbitos como el paisajístico y con él podría existir una afectación al turismo local, pero su incidencia en la provisión de agua será escasa; no obstante, un proceso articulado de conservación páramo-glaciar, considerándolo como elementos complementarios, permitirían una mejor gestión de las políticas y de las acciones a implementar.

Por último, la comunidad científica debe mantener vínculos con las comunidades que se ven afectadas por este retroceso glaciar, ya que finalmente son las personas quienes hacen evidente esta realidad más allá del comportamiento de las series meteorológicas.

Agradecimientos

Dra. Sophie Cauvy, Ing. Paúl Jínez, Ing. Gustavo Lucero, Susana Escandón, Ana González, Luis Chicaiza. A los andinistas que brindaron su soporte y ayuda en el trabajo de campo y facilitaron su archivo fotográfico: Ing. Robert Deley y al Ing. Armando Condo. Al Lic. Marco Cruz por su valioso aporte desde su visión de montañista.

Contribución de los autores

DHP; Conceptualización, investigación, supervisión administración de proyecto tratamiento de datos, visualización, escritura-borrador original. JCRH; Curación de datos, escritura-revisión y edición, investigación, recursos, validación. LM; investigación, recursos, escritura-revisión y edición. BC; investigación, recursos, escritura-revisión y edición. VCP; investigación, recursos, escritura-revisión y edición. CD; Curación de datos, análisis formal, investigación, metodología, software, visualización, escritura-revisión y edición. TC; investigación, recursos, escritura-revisión y edición. MV; Conceptualización, investigación análisis formal, metodología, supervisión administración de proyecto, tratamiento de datos, visualización, validación, escritura–revisión y edición.

Referencias

Aguilar-Lome, J. y col. (2019). «Elevation-dependent warming of land surface tempera-

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

tures in the Andes assessed using MODIS LST time series (2000-2017)». En: *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 77, 119-128. Online:https://n9.cl/wjgde.

Bahr, D., W. Pfeffer y G. Kaser (2015). «A review of volume-area scaling of glaciers». En: *Reviews of Geophysics* 53.1, 95-140. Online:https://n9.cl/dfiof.

Bahr D.and Meier, M. y S. Peckham (1997). «The physical basis of glacier volume-area scaling». En: *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 102.B9, 20355-20362. Online:https://n9.cl/8u4xq.

Basantes-Serrano, R. y col. (2016). «Slight mass loss revealed by reanalyzing glacier mass-balance observations on Glaciar Antisana 15α (inner tropics) during the 1995–2012 period». En: *Journal of Glaciology* 62.231, 124-136. Online:https://n9.cl/ir0ws.

Basantes-Serrano, R. y col. (2022). «New insights into the decadal variability in glacier volume of a tropical ice cap, Antisana (0° 29 S, 78° 09 W), explained by the morpho-topographic and climatic context». En: *The Cryosphere* 16.11, 4659-4677. Online:https://n9.cl/2k8ja.

Basantes, R. (2010). «Análisis espacio-temporal de comportamiento geométrico de los glaciares del Volcán Antisana y su relación con la variabilidad climática». Tesis de mtría. Univ. Nice, France.

Bradley, R. y col. (2009). «Recent changes in freezing level heights in the Tropics with implications for the deglacierization of high mountain regions». En: *Geophysical Research Letters* 36. Online:https://n9.cl/0xqs2w.17.

Buytaert, Wo. y col. (2017). «Glacial melt content of water use in the tropical Andes». En: *Environmental Research Letters* 12.11, 114014. Online:https://n9.cl/afbv7.

Byrd, R. y col. (1995). «A limited memory algorithm for bound constrained optimization». En: *SIAM Journal on scientific computing* 16.5, 1190-1208. Online:https://n9.cl/1p00f.

CECS (2009). *Estrategia Nacional de Glaciares. Fundamentos*. Inf. téc. Centro de Estudios Científicos.

Cabrera, A. y H. Romero (2013). «Evaluación cualitativa de la vulnerabilidad al cambio climático de los principales ecosistemas del Distrito Metropolitano de Quito. Vulnerabilidad de ecosistemas: evaluación cualitativa (WP5)».

Caceres, B. (2010). «Actualización del inventario de tres casquetes glaciares del Ecuador». Tesis de mtría. Université Nice Sophia Antipolis.

Cáceres, B. y S. Cauvy (2015). «Carihuayrazo SW a little Ecuadorian glacier in the way to extinction». En: *AGU Fall Meeting*. C13B-0812, págs. 58-77.

Cáceres, B. y col. (2006). «El glaciar 15 del Antisana: investigaciones glaciológicas y su relación con el recurso hídrico.» En: *(Proceedings of the Fifth FRIEND World Conferenceheld at Havana*. Vol. 308, 479-482. Online:https://n9.cl/agivop.

Caro, A. y col. (2023). «Hydrological Response of Andean Catchments to Recent Glacier Mass Loss». En: *EGUsphere* 2023, págs. 1-26.

Clapperton, C. (1990). «Glacial and volcanic geomorphology of the Chimborazo-Carihuairazo massif, Ecuadorian Andes». En: *Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh* 81.2, 91-116. Online:https://n9.cl/8gwljz.

Condom, T. y col. (2011). «Modelling the hydrologic role of glaciers within a Water Evaluation and Planning System (WEAP): a case study in the Rio Santa watershed (Peru)». En: *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* 8.1, 869-916. Online:https://n9.cl/zna9h.

Domínguez-Castro, F., R. García y S. Vicente (2018). «Wet and dry extremes in Quito (Ecuador) since the 17th century». En: *International Journal of Climatology* 38.4, 2006-2014. Online:https://n9.cl/vl418.

Domínguez, C. y col. (2012). *Modelación hidroglaciológica con escenarios globales a2 y b2 en el glaciar crespos del Antisana.* Inf. téc. Documento no publicado.

Dussaillant, I. y col. (2019). «Two decades of glacier mass loss along the Andes». En: *Nature Geoscience* 12.10, 802-808. Online:https://n9.cl/r1m8c.

El Comercio (2009). *Cronología de la erupción del volcán Tungurahua en los últimos 10 años*.

— (2016). *Volcán Tungurahua arroja ceniza por segundo día y afecta los cultivos*.

Favier, V. y col. (2004). «One-year measurements of surface heat budget on the ablation zone of Antizana Glacier 15, Ecuadorian Andes». En: *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 109. Online:https://n9.cl/jwekz.D18.

Favier, V. y col. (2008). «Evidence of groundwater flow on Antizana ice-covered volcano, Ecuador/Mise en évidence d'écoulements sou-

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

terrains sur le volcan englacé Antizana, Equateur». En: *Hydrological Sciences Journal* 53.1, 278-291. Online:https://n9.cl/zg14u.

Fernádez, A. (2018). «Aplicación de balance de energía para analizar el forzamiento atmosférico en la producción de caudales en un glaciar tropical. Caso de estudio: Glaciar 12 del volcán Antisana». Tesis de mtría. Escuela Politécnica Nacional.

Fernández Yánez, A. O. (2010). «Modelación del balance de masa del galciar 15a del volcán Antisana usando software WEAP». Rep. de inv. Quito: Escuela Politécnica Nacional.

Francou, B. y col. (2004). «New evidences of ENSO impacts on glaciers at low latitude: Antizana 15, Andes of Ecuador, 0 28'». En: *Journal of Geophysical Research* 109. Online:https://n9.cl/zxwgq, pág. 1029.

Francou, B. y col. (2011). *Analizando el cambio climático a partir de los glaciares del Ecuador*. IRD, SENECYT, EPMAPS, INAMHI, EPN.

French A. adn Baraer, M. y col. (2016). «Naturaleza y sociedad: Perspectivas socio-ecológicas sobre cambios globales en América Latina». En: IEP e INTE-PUCP. Cap. Coyuntura crítica: cambio climático, globalización y doble exposición en el sistema socio-hidrológico de la cuenca del río Santa, Perú, págs. 303-340.

GAD Parroquía Rural de Pilahuín (sep. de 2015). *Plan de desarrollo y ordenamiento territorial 2015-2020*. Inf. téc. Gobierno Autónomo Desentralizado de Pilahuín.

García, Rengifo (2022). *La variabilidad climática en la cuenca hidrográfica del río Chalpi Grande y su importancia para los sistemas de abastecimiento de agua potable para la ciudad de Quito*. Tesis de mtría.

Gobierno Provincial de Tungurahua (ago. de 2011). *Programa de agua y cuencas del Tungurahua. Informe Principal*. Inf. téc. Gobierno Provincial de Tungurahua y Consorcio kfw-CES-GFA.

Grinsted, A. (2013). «An estimate of global glacier volume». En: *The Cryosphere* 7.1, 141-151. Online:https://n9.cl/gh46r.

Gualco, L. y col. (2022). «Assessing the contribution of glacier melt to discharge in the tropics: the case of study of the Antisana glacier 12 in Ecuador». En: *Frontiers in Earth Science* 10, 732635. Online:https://n9.cl/djm22.

Guijarrom, J. (2023). *Climatol: Climate Tools (Series Homogenization and Derived Products)*.

Hersbach, Hans y col. (2020). «The ERA5 global reanalysis». En: *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 146.730, págs. 1999-2049.

Hugonnet, R. y col. (2021). «Accelerated global glacier mass loss in the early twenty-first century». En: *Nature* 592.7856, 726-731. Online:https://n9.cl/6ff11u.

Imfeld, N. y col. (2021). «A combined view on precipitation and temperature climatology and trends in the southern Andes of Peru». En: *International journal of climatology* 41.1, 679-698. Online:https://n9.cl/twlia.

Instituto Geofísico de la Politécnica Nacional (2015). *Informe especial del volcán Tungurahua N°. 10*.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2022). «Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change». En: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*.

Johansen, K. y col. (2019). *El Atlas de Glaciares y Aguas Andinos: el impacto del retroceso de los glaciares sobre los recursos hídricos*. UNESCO Publishing.

Jordan, E. y col. (2005). «Estimation by photogrammetry of the glacier recession on the Cotopaxi Volcano (Ecuador) between 1956 and 1997/Estimation par photogrammétrie de la récession glaciaire sur le Volcan Cotopaxi (Equateur) entre 1956 et 1997». En: *Hydrological Sciences Journal* 50.6, 961. Online:https://n9.cl/37pa4.

Juen, I. (2006). «Glacier mass balance and runoff in the tropical Cordillera Blanca, Perú.» Tesis doct. University of Innsbruck.

Kalnay, E. y col. (1996). «The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project». En: *Bull. Am. Meteor. Soc* 77, 437-471. Online:https://n9.cl/ckmfm.

La Frenierre, J. y B.M. Mark (2017). «Detecting Patterns of Climate Change at Volcán Chimborazo, Ecuador, by Integrating Instrumental Data, Public Observations, and Glacier Change Analysis». En: *Annals of the American Association of Geographers* 107.4, págs. 979-997.

Manciati, C. y col. (2014). «Empirical mass balance modelling of South American tropical glaciers: case study of Antisana volcano, Ecuador». En: *Hydrological Sciences Journal* 59.8, págs. 1519-1535.

Morán-Tejeda, E. y col. (2016). «Climate trends and variability in Ecuador (1966–2011)». En: *Interna-*

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

tional Journal of Climatology 36.11, 3839-3855. Online:https://n9.cl/7553z.

Moreno, R. (2023). «Restauración geomorfológica sobre depósitos de relaves: caso de estudio aplicado a la concesión minera Río Blanco, Ecuador». En: *La Granja* 37.1, 130-141. Online:https://n9.cl/7553z.

Naranjo-Silva, S. (2024). «A hydropower development perspective in Ecuador: past, present, and future». En: *La Granja* 39. Online:https://n9.cl/tea6hr.1.

Pacheco-Peña, D, Luis Lema Quinga y Patricio Yánez Moretta (2023). «Cogestión del agua entre actores públicos y comunitarios como herramienta de adaptación al cambio climático global: el caso de la Comuna Santa Clara de San Millán, DM Quito». En: *La Granja* 37.1, 44-57. Online:https://n9.cl/aecgrj.

Piedra Santillan, D. (2021). «Modelación hidro glaciológica con escenarios globales RCP8. 5 y RCP4. 5 en el glaciar Crespos del Antisana». Tesis de mtría. Escuela Politécnica Nacional.

Postigo, J. (2013). «Cambio climático, movimientos sociales y políticas públicas. Una vinculación necesaria». En: CLACSO. Cap. Desencuentros y (potenciales) sinergias entre las respuestas de campesinos y autoridades regionales frente al cambio climático en el sur andino peruano, págs. 181-216.

Pouget, J. y col. (2017). «Modélisation glacio-hydrologique et gestion des ressources en eau dans les Andes équatoriennes: L'exemple de Quito». En: *Hydrological Sciences Journal* 62.3, 431-446. Online:https://n9.cl/vhyjw.

Pouget, J.C. (2011). *Propuesta del modelo Ice KISS como un componente de un sistema de apoyo a la planificación de los recursos hídricos*. Rep. de inv. Quito: IRD.

Pouyaud, B., B. Francou y P. Ribstein (1995). «Un réseau d'observation des glaciers dans les Andes tropicales». En: *Bulletin de l'Institut Français d'Etudes Andines* 24.3, 707-714. Online:https://n9.cl/na5s1.

Rabatel, A. y col. (2013). «Current state of glaciers in the tropical Andes: a multi-century perspective on glacier evolution and climate change». En: *The Cryosphere* 7.1, 81-102. Online:https://n9.cl/4wqs6n.

Radić, V., R. Hock y J. Oerlemans (2007). «Volume-area scaling vs flowline modelling in glacier volume projections». En: *Annals of Glaciology* 46, 234-240. Online:https://n9.cl/4rhg6.

Ramírez, E. (2008). «Impactos del cambio climático y gestión del agua sobre la disponibilidad de recursos hídricos para las ciudades de La Paz y El Alto». En: *Revista Virtual LEDESMA* 2.3, 49-61. Online:https://n9.cl/fmpyf.

Ramirez, E. y col. (2001). «Small glaciers disappearing in the tropical Andes: a case-study in Bolivia: Glaciar Chacaltaya (16o S)». En: *Journal of Glaciology* 47.157, 187-194. Online:https://n9.cl/j9mb5.

Rhoades, R. (2008). «Desaparición del glaciar Mama Cotacachi: investigación etnoecológica y cambio climático en los Andes de Ecuador.» En: *Pirineos* 163, 37-50. Online:https://n9.cl/z4dga.

Rosero, P. y col. (2021). «Multi-taxa colonisation along the foreland of a vanishing equatorial glacier». En: *Ecography* 44.7, 1010-1021. Online:https://n9.cl/sh10d.

Salcedo, S. (2019). «Variación espaciotemporal de impurezas (partículas) absorbentes de luz y cenizas volcínicas en la superficie del nevado Coropuna, Arequipa». Tesis de mtría. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.

Sandoval, C. (2021). «Sistemas inteligentes para la protección de ecosistemas, flora y fauna». En: *UNIVERSIDAD, CIENCIA y TECNOLOGÍA* 25.110, 138-154. Online:https://n9.cl/54lbv.

Santos, T. y J. Tellería (2006). «Pérdida y fragmentación del hábitat: efecto sobre la conservación de las especies». En: *Ecosistemas* 15.2, 3-12. Online:https://n9.cl/uyz2w.

Seiler, C., R. Hutjes y P. Kabat (2013). «Climate variability and trends in Bolivia». En: *Journal of applied meteorology and climatology* 52.1, 130-146. Online:https://n9.cl/xs4ht1.

Sicart, J., R. Hock y D. Six (2008). «Glacier melt, air temperature, and energy balance in different climates: The Bolivian Tropics, the French Alps, and northern Sweden». En: *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 113. Online:https://n9.cl/c1bys.D24.

Vasconez, F. y col. (2021). «Secondary lahars triggered by periglacial melting at Chimborazo volcano, Ecuador». En: *Revista Politécnica* 48.1, 19-30. Online:https://n9.cl/c7n38.

Vicente-Serrano, S. y col. (2017). «The complex influence of ENSO on droughts in Ecuador». En: *Climate Dynamics* 48, 405-427. Online:https://n9.cl/6j2gz.

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Vilela, M. (2011). «Cambio climático, movimientos sociales y políticas públicas. Una vinculación necesaria». En: CLACSO. Cap. Desencuentros y (potenciales) sinergias entre las respuestas de campesinos y autoridades regionales frente al cambio climático en el sur andino peruano, págs. 181-216.

Villacis (2008). «Ressources en eau glaciaire dans les Andes d'Equateur en relation avec les variations du climat: le cas du volcan Antisana». Tesis de mtría. Université Montpellier II.

Vuille, M. (2013). «El cambio climático y los recursos hídricos en los Andes tropicales». En: *Banco Interamericano de Desarrollo* 21. Online:https://n9.cl/qze2o.

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

La granja:
Revista de
Ciencias de la Vida

pISSN:1390-3799; eISSN:1390-8596

http://doi.org/10.17163/lgr.n39.2024.07

Artículo científico / Scientific paper

Ciencias de la Tierra

Análisis de Susceptibilidad a Deslizamientos empleando el Proceso de Jerarquía Analítica en una carretera amazónica del Ecuador

Landslides Susceptibility Analysis employing Analytical Hierarchy Process on an Amazonian roadway in Ecuador

Cristian J. Cargua*[1], Ronny Espin[2], Bryan G. Valencia[3], Marco Simbaña[4], Sebastián Araujo[2], Carolina Cornejo[3] y Anderson Ocampos[2]

[1]*Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Unidad de Posgrado, Lima, Perú.*
[2]*Grupo de Investigación en Geofísica y Geotecnia, Facultad de Ciencias de la Tierra y Agua, Universidad Regional Amazónica Ikiam, Muyuna Km 7, Tena, Napo, Ecuador.*
[3]*Grupo de Investigación de Ciencias de la Tierra y Clima, Facultad de Ciencias de la Tierra y Agua, Universidad Regional Amazónica Ikiam, Muyuna Km 7, Tena, Napo, Ecuador.*
[4]*Universidad de Investigación de Tecnología Experimental Yachay, Urcuquí, Ecuador.*

*Autor para correspondencia: cristian.cargua@unmsm.edu.pe

Manuscrito recibido el 19 de mayo de 2022. Aceptado, tras revisión, el 06 de julio de 2023. Publicado el 1 de marzo de 2024.

Resumen

La carretera Puyo-Tena es propensa a deslizamientos de tierra debido a la geodinámica, geomorfología y materiales geológicos de la zona (afloramientos y estratos inestables). En los últimos años, este problema ha provocado de forma persistente la inutilización parcial o total de la carretera en numerosas ocasiones. El objetivo de la investigación fue generar un modelo cartográfico de susceptibilidad a deslizamientos a partir de variables como la pendiente, las formaciones geológicas, la cobertura y uso de la tierra, así como las distancias a fallas, carretera y ríos. El grado de incidencia de deslizamientos se estimó como la combinación lineal de las variables ponderadas mediante el proceso de jerarquía analítica. La importancia de este método semicuantitativo radica en su capacidad para desagregar un problema de decisión complejo en un modelo de decisión más simple y coherente. El modelo cartográfico resultante se reclasificó en cinco categorías de susceptibilidad: muy baja, baja, moderada, alta y muy alta. Los resultados mostraron que 17 km de los 80 km de la carretera Puyo-Tena tienen una alta probabilidad a deslizamientos, lo que equivale a 21,25% de la carretera. Además, dentro de este porcentaje, se determinó que existen quince regiones con alta probabilidad de deslizamientos debido a su ubicación en zonas con fuertes pendientes, litología porosa y permeable, gran cantidad de ríos y suelos agrícolas. Para la verificación del modelo se utilizó el área bajo la curva (en inglés AUC) de la característica operativa del receptor (en inglés ROC). Los resultados de la verificación mostraron que el modelo cartográfico para el área de estudio tiene un valor de precisión de 83,7%. El modelo cartográfico de susceptibilidad a deslizamientos permitirá tomar las decisiones pertinentes para mitigar eventos potenciales que puedan poner en peligro a transportistas, bienes materiales y residentes de la zona.

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Palabras clave: susceptibilidad, deslizamiento, proceso de jerarquía analítica, sistema de información geográfica (SIG), modelo cartográfico de susceptibilidad.

Abstract

The Puyo-Tena roadway is prone to landslides due to the geodynamics, geomorphology, and geological materials of the area (unstable outcrops and strata). In recent years, this problem has persistently caused the road to be partially or completely disabled on numerous occasions. The objective of the research was to generate a cartographic model of landslides susceptibility based on variables such as slope, geological formations, land cover and land use, as well as distances to faults, road, and rivers. The degree of landslides incidence was estimated as the linear combination of the weighted variables using the analytic hierarchy process. The importance of this semi-quantitative method lies in its ability to break down a complex decision problem into a simpler and more coherent decision model. The resulting cartographic model was classified into five susceptibility categories: very low, low, moderate, high, and very high. The results showed that 17 km out of the 80 km of the Puyo-Tena roadway have a high probability of landslides, which is equivalent to 21.25% of the road. Furthermore, within this percentage, it was determined that there are fifteen regions with a high probability of landslides due to their location in areas with steep slopes, porous and permeable lithology, a large number of rivers, and agricultural soils. The area under the curve (AUC) of the receiver operating characteristic (ROC) was used for model verification. The verification results showed that the cartographic model for the study area has an accuracy value of 83.7%. The cartographic model of landslide susceptibility will enable relevant decisions to be made to mitigate potential hazards that may endanger transporters, material goods, and residents of the area.

Keywords: susceptibility, landslide, analytical hierarchy process, geographic information system (GIS), susceptibility mapping model.

Forma sugerida de citar: Cargua, C., Espin, R., Valencia, B., Simbaña, M., Araujo, S., Cornejo, C. y Ocampos, A. (2024). Análisis de Susceptibilidad a Deslizamientos empleando el Proceso de Jerarquía Analítica en una carretera amazónica del Ecuador. La Granja: Revista de Ciencias de la Vida. Vol. 39(1):116-136. http://doi.org/10.17163/lgr.n39.2024.07.

IDs Orcid:

Cristian J. Cargua: https://orcid.org/0000-0003-3036-270X
Ronny Espin: https://orcid.org/0000-0003-0409-4764
Bryan G. Valencia: https://orcid.org/0000-0002-5970-4964
Marco Simbaña: https://orcid.org/0000-0003-2974-3839
Sebastián Araujo: https://orcid.org/0000-0002-9704-5779
Carolina Cornejo: https://orcid.org/0000-0002-4421-1032
Anderson Ocampos: https://orcid.org/0000-0003-4094-2337

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

1 Introducción

Los deslizamientos se caracterizan por ser movimientos de masa de rocas, tierra y escombros bajo la influencia directa de la gravedad (Cruden, 1991; Cruden y Varnes, 1996). Estos movimientos son parte de la dinámica geológica del planeta influenciados por actividades humanas, lluvias o sobrecargas estáticas, que ocasionan que estos se aceleren y en algunos casos sean catastróficos (Pourghasemi y col., 2018; Basu y Pal, 2020). La susceptibilidad a los deslizamientos indica qué tan propensa es una zona en específico a fallar, ya sea a nivel local o regional (Hearn y Hart, 2019). Esta susceptibilidad suele expresarse con un modelo cartográfico de susceptibilidad a los deslizamientos que muestra la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos, independientemente de la escala de tiempo. La relevancia de estos modelos cartográficos radica en que su desarrollo es específico y detallado acerca de una zona en particular.

Con el propósito de determinar la susceptibilidad a deslizamientos, la cartografía analiza variables que afectan la estabilidad del terreno como la geología, geomorfología, topografía y distancia a ríos (Raghuvanshi, Ibrahim y Ayalew, 2014; Dahal y Dahal, 2017; Hamza y Raghuvanshi, 2017; Vásquez, 2023). La elaboración de modelos cartográficos de susceptibilidad considera la calidad de datos, resolución espacial del área de trabajo y la metodología para el análisis y digitalización de las variables empleadas (Mansouri Daneshvar, 2014). El desarrollo de estos modelos considera enfoques cualitativos (como el método heurístico y método Mora-Vahrson-Mora, cuantitativos (como el método determinístico y método estadístico) o la unión de ambos. Históricamente, los primeros modelos en desarrollarse constaban de datos cualitativos con aspectos geológicos y morfológicos de deslizamientos de laderas inventariadas (Nilsen y col., 1979; Mallick y col., 2018). Progresivamente, fueron perfeccionándose e incluían análisis más robustos como los análisis de jerarquía analítica (Komac, 2006; Tešić y col., 2020; Chanu y Bakimchandra, 2022), bivariados (Van Westen, 1997; Jamir y col., 2022), multivariados (Carrara, 1983; Benchelha y col., 2020; Pham y col., 2021), regresión logística (Dai y col., 2001; Lee y Min, 2001; Nhu y col., 2020; Wubalem y Meten, 2020), lógica difusa (Ercanoglu y Gokceoglu, 2004; Bahrami, Hassani y Maghsoudi, 2021; Bien y col., 2022) y redes neuronales artificiales (Bragagnolo, Silva y Grzybowski, 2020; Bravo-López y col., 2022; Gameiro, Oliveira y Guasselli, 2022).

Los métodos cualitativos se caracterizan por incorporar la opinión del experto en función de resultados empíricos realizados a pequeña escala (Demir y col., 2013; Roccati y col., 2021; Asmare, 2023). Por lo general, los métodos cualitativos más comunes se limitan a analizar las propiedades geológicas y geomorfológicas de deslizamientos inventariados. Sin embargo, existen métodos cualitativos más sofisticados como los semicuantitativos (Nicu y Asăndulesei, 2018; Dolui, Yuvaraj y Geetha, 2019). Un método semicuantitativo emplea procedimientos de ponderación y clasificación en métodos cualitativos. Un claro ejemplo, es el proceso de jerarquía analítica desarrollado por Saaty (1990), el cual ha sido empleado en esta investigación. Este método se ha convertido en una herramienta muy utilizada ya que ayuda a los responsables de la toma de decisiones a elegir el mejor criterio, reduciendo las decisiones complejas a una serie de pares comparativos y sintetizando los resultados (Sonker, Tripathi y Singh, 2021). Por ello, es que esta herramienta ha sido ampliamente utilizada por varios investigadores en el mundo para el desarrollo de modelos cartográficos para la susceptibilidad a los deslizamientos (Guillen y col., 2022; Ozturk y Uzel-Gunini, 2022; Salcedo y col., 2022; Wang y col., 2022; Okoli y col., 2023).

Una característica de la región amazónica del Ecuador es la frecuencia de deslizamientos de tierra alrededor de principales poblados y redes importantes de conexión vial (Gobierno Cantonal de Pastaza, 2020; Gobierno Provincial de Napo, 2020; Secretaría Técnica de la Circunscripción Territorial Especial Amazónica, 2021; Servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias, 2022b; Servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias, 2022a). Sin embargo, la baja resolución espacial de los modelos de susceptibilidad disponibles a escala regional impide conocer la susceptibilidad de zonas puntuales (Zumpano y col., 2014). Por ejemplo, la carretera Puyo – Tena, ubicada entre las provincias de Pastaza y Napo, no cuenta con estudios a detalle por parte de los gobiernos autónomos descentralizados en relación a la susceptibilidad a los deslizamientos tal y como se aprecia en los reportes del Gobierno Cantonal de Pastaza (2020) y Gobierno

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Provincial de Napo (2020). Esta carretera presenta a menudo constantes deslizamientos que han afectado la vialidad entre ambas provincias (Ecoamazónico, 2014; Ecoamazónico, 2020; Ecoamazónico, 2021; Correo, 2017; Obras Públicas Ecuador, 2022). Por lo tanto, la presente investigación tiene como objetivo generar un modelo cartográfico de susceptibilidad a los deslizamientos que identifique las regiones más propensas a deslizamientos a lo largo de la carretera Puyo– Tena. Esta ruta se considera como una importante red de conexión que une al Ecuador con su Amazonía.

2 Descripción del Área de Estudio

La investigación se realizó en la carretera Puyo–Tena, entre las provincias de Pastaza y Napo, en la Amazonía ecuatoriana (Figura 1). La carretera se encuentra delimitada al oeste por la Cordillera Real, al norte por el cantón Tena, al este por la Cuenca Oriente y al sur por el cantón Pastaza. Además, posee una gran variedad de geoformas como regiones montañosas, vertientes y planicies (Ministerio del Ambiente de Ecuador, 2014).

Los aspectos que engloban el área de estudio son pendiente (desde 5° a >70°), altitud (desde los 449 metros sobre el nivel del mar (en adelante m. s. n. m.) hasta los 1108 m. s. n. m.), precipitación (desde los 3500 mm/año hasta los 4500 mm/año) y suelos residuales. Además, el área de interés tiene una temperatura promedio anual de 23,5 °C y una precipitación anual de 4200 mm (Harris y col., 2020). Ciertas zonas de los taludes estudiados al carecer de cobertura vegetal, contar con litología porosa y precipitaciones fuertes, desarrollan condiciones idóneas para que existan altos índices de infiltración, haciéndolos susceptibles a deslizamientos y erosión del suelo (Laraque y col., 2004; Bravo y col., 2017).

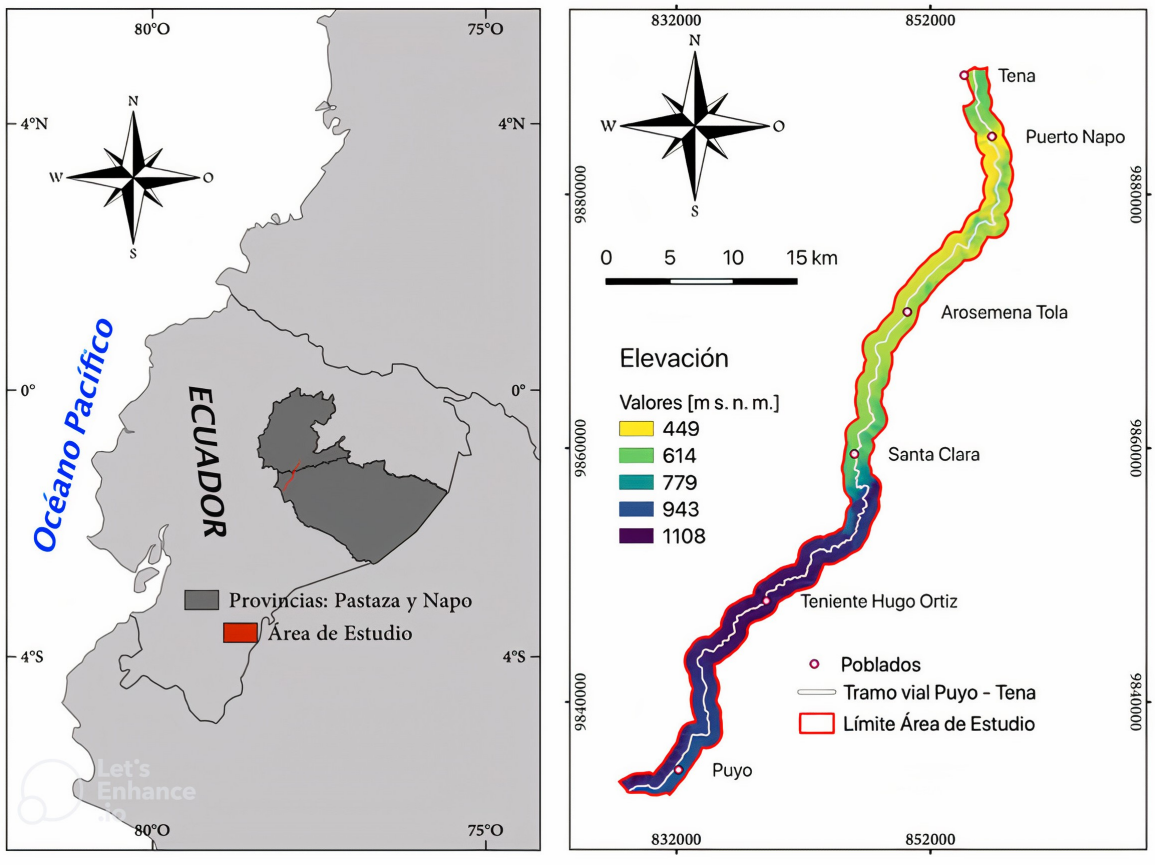

Figura 1. Ubicación del área de estudio.

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

3 Materiales y Métodos

Se utilizó el Proceso de Jerarquía Analítica conocido también como AHP por sus siglas en inglés (Analytical Hierarchy Process). AHP es un método semicuantitativo basado en la evaluación multicriterio de toma de decisiones para tratar problemas complejos y multiatributos (Gudiyangada Nachappa y col., 2020). El proceso de jerarquía analítica desarrollado por Saaty (1990) desagrega un problema de decisión compleja en diferentes niveles jerárquicos y permite cuantificar las opiniones y transformarlas en un modelo de decisión coherente. El proceso se basa en cuatro principios: i) desarrollo de jerarquía, ii) comparación de pares, iii) síntesis de juicios y iv) comprobación de consistencia. Este método conjuntamente con la combinación lineal ponderada permite tener la representación gráfica de las zonas más susceptibles a deslizamientos. Al final, el proceso de jerarquía analítica confiere la mejor opción para la toma de decisiones (Mallick y col., 2018; Basu y Pal, 2020; Zhou, Zhou y Tan, 2020). El proceso llevado a cabo hasta obtener el modelo cartográfico de susceptibilidad a los deslizamientos se detalla a continuación.

3.1 Inventario de Deslizamientos

De acuerdo con Wieczorek (1984), es necesario proporcionar un mapa de deslizamientos para discernir ubicaciones y especificar deslizamientos que se han producido con diferentes escalas espaciales y temporales. Por ende, una base de datos representativa de los deslizamientos es un requisito previo para cualquier evaluación de peligro o riesgo de deslizamientos (Varnes e International Association of Engineering Geology, 2021; Guzzetti y col., 1999), y un modelo cartográfico de susceptibilidad a los deslizamientos no es la excepción. Utilizando ortofotografías como base, se identificaron deslizamientos que luego fueron confirmados en campo mediante tres días de recorrido (27, 28 y 29 de julio del 2021). Además, producto del recorrido *in situ* se encontraron otros deslizamientos. Cada deslizamiento encontrado fue georreferenciado y caracterizado en función de su litología y tipo de deslizamiento. En total se identificaron 62 deslizamientos a lo largo de la carretera de interés. En la Tabla 1 y Figura 2 se muestran los deslizamientos de mayor tamaño.

Tabla 1. Parte representativa del inventario de los deslizamientos encontrados en la carretera Puyo-Tena.

Inventario	Coordenadas Grado-Decimal		Formación	Tipo de
	Longitud	Latitud	Geológica	Deslizamiento
1	−77,8088°	−1,1159°	Arajuno	Rotacional
2	−77,7947°	−1,0978°	Chalcana	Caída
3	−77,7933°	−1,0936°	Chalcana	Caída
4	−77,7905°	−1,0831°	Chalcana	Rotacional
5	−77,7912°	−1,0789°	Tiyuyacu	Rotacional

3.2 Preparación de las Capas de las Variables de Deslizamientos

Toda la información utilizada para cumplir con el objetivo se recopiló de fuentes gubernamentales y educativas. Esta información se detalla en la Tabla 2. Se estableció que las variables a ser consideradas en la susceptibilidad a los deslizamientos fueron las formaciones geológicas, la pendiente, las fallas geológicas, la construcción de la carretera, la distancia a ríos y la cobertura y uso de la tierra (en adelante CUT). La selección de las seis variables y sus categorías se realizó en función a la información obtenida en campo y oficina. Estudios similares suscitado en la región respaldan la importancia de tomar en cuenta este tipo de variables en la realización de modelos cartográficos de susceptibilidad a los deslizamientos (Klimeš y Rios Escobar, 2010; Ortiz y Martínez-Graña, 2018; Barella, Sobreira y Zêzere, 2019; Orejuela y Toulkeridis, 2020; Vásquez, 2023). Las categorías se refieren a las distintas divisiones que tiene cada variable; por ejemplo, las formaciones Napo, Tena y Mera son categorías de la variable formaciones geológicas. Posteriormente, las variables seleccionadas fueron convertidas en capas temáticas como paso inicial en el desarrollo del modelo cartográfico de susceptibilidad.

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

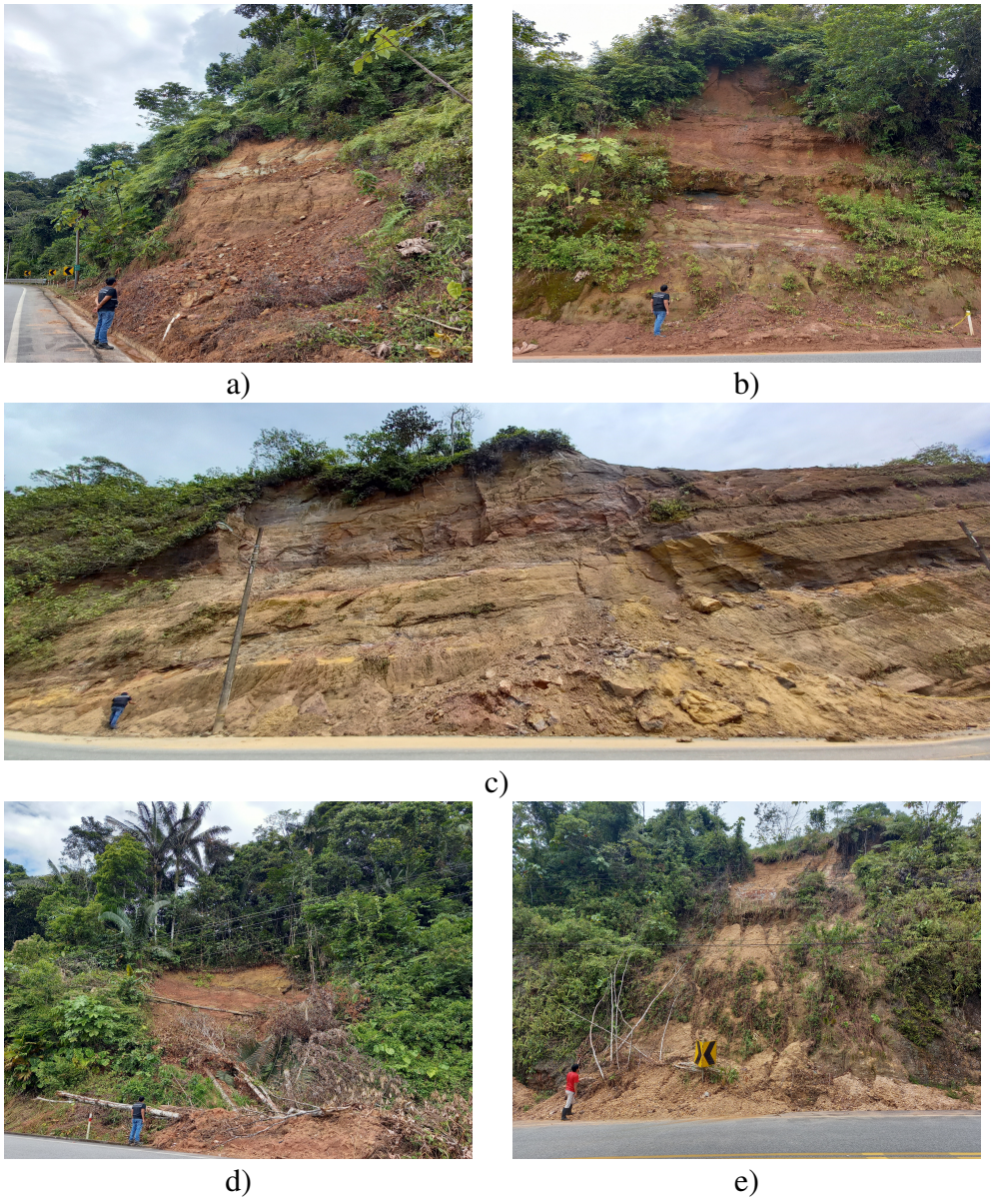

Figura 2. Deslizamientos de acuerdo con el inventario de la Tabla 1: a) es 1, b) es 2, c) es 4, d) es 3 y e) es 5.

Todas las capas temáticas fueron rasterizadas con una resolución de píxel de 12,5 m. Todas las ponderaciones hechas para las seis variables y sus categorías fueron seleccionadas de acuerdo con los análisis efectuados en campo y oficina. Las reclasificaciones para cada capa temática se realizaron con base en los datos obtenidos de cada variable. Posteriormente, se combinaron las capas temáticas, analizadas con el AHP mediante la Combinación Lineal Ponderada (WLC por sus siglas en ingles Weighted Linear Combination) el cual es un método analítico e híbrido (cualitativo y cuantitativo) usado en SIG para procesar capas ráster (Feizizadeh y Blaschke, 2013). La distancia a las fallas geológicas, carretera y ríos se calcularon mediante la herramienta buffer en QGIS. La pendiente se obtuvo a partir de un Modelo Digital de Elevación o DEM por sus siglas en inglés (Digital Elevation Model) de 12,5 m de resolución del píxel para el área de estudio. Todos los procedimientos de análisis espacial se realizaron en el software libre QGIS versión 3,4 Madeira (Figura 3).

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Tabla 2. Fuentes de datos usados para el estudio.

Datos	Descripción	Fuente
Ortofotografías (Resolución 0,30 m)	Descargado	PROGRAMA SIGTIERRAS http://www.sigtierras.gob.ec/
Modelo Digital de Elevación – DEM (Resolución 12,5 m)	Descargado	ASF https://search.asf.alaska.edu/#/
Pendiente	Derivado del DEM 12,5 m	DEM 12,5 m
Formaciones Geológicas	Descargado	MAGAP http://geoportal.agricultura.gob.ec/
Fallas Geológicas	Descargado	PROYECTO SARA https://sara.openquake.org/start
Carretera	Descargado	IGM http://www.geoportaligm.gob.ec/portal/
Ríos	Descargado	IGM http://www.geoportaligm.gob.ec/portal/
Cobertura y uso de la Tierra (CUT)	Descargado	MAGAP http://geoportal.agricultura.gob.ec/

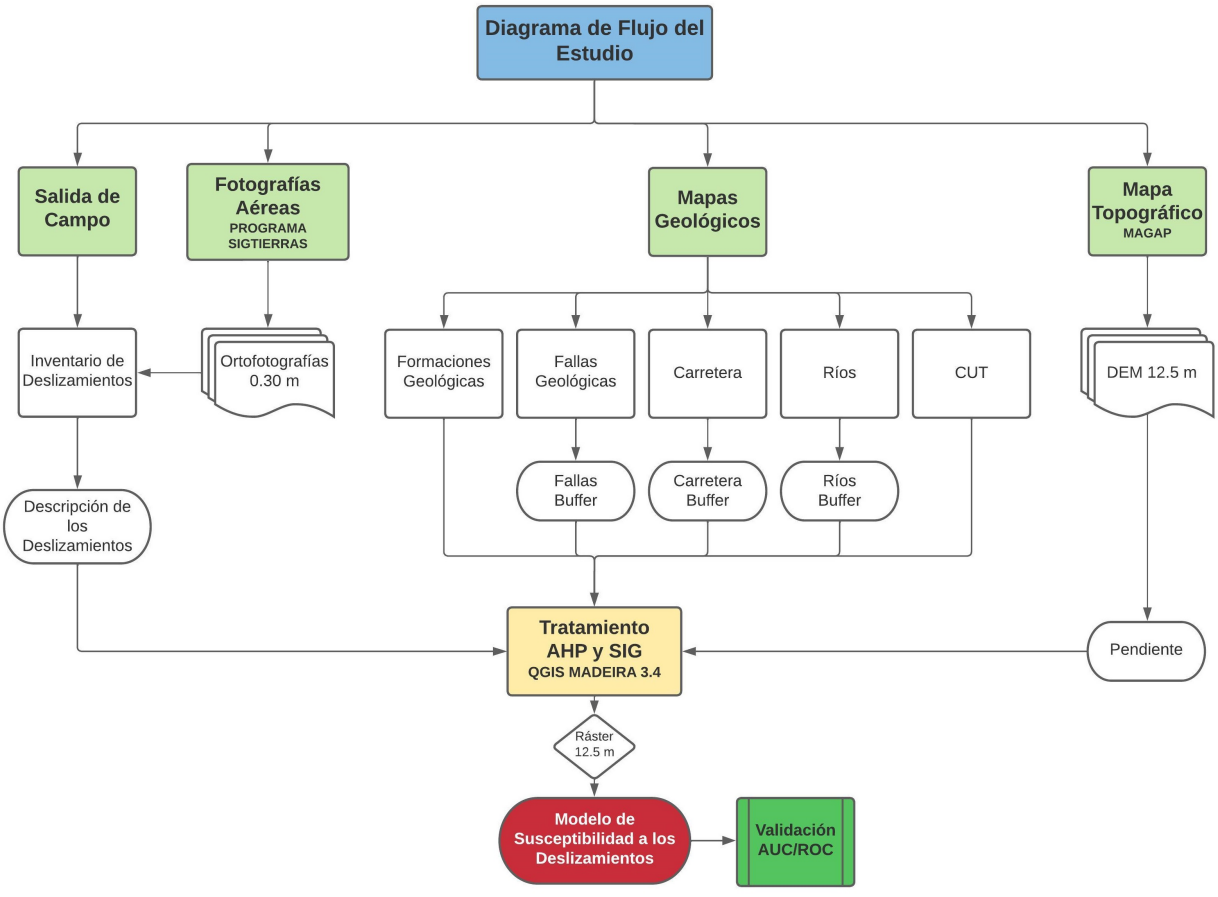

Figura 3. Diagrama de Flujo del Estudio.

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Todas las capas temáticas vectoriales se rasterizaron con resolución de píxel de 12,5 m $\times$ 12,5 m. La rasterización permitió que las seis capas temáticas pudieran ser combinadas y formar una sola capa ráster. Se seleccionó la resolución de píxel de 12,5 m debido a que con esa resolución espacial se trabajó el DEM. El procedimiento de cada una de las variables se detalla a continuación.

Pendiente

Los valores de pendiente se extrajeron del DEM de 12,5 m de resolución de píxel. La pendiente es una variable indispensable, ya que dependiendo de su ángulo de inclinación ocasionará que haya mayor o menor susceptibilidad a deslizamientos (Dolui, Yuvaraj y Geetha, 2019; Nguyen y col., 2019; Bahrami, Hassani y Maghsoudi, 2021). En este estudio, esta capa temática se obtuvo al usar la librería gdaldem de QGIS, y se categorizó en seis partes: $< 5°$, 5 – 12°, 12 – 25°, 25 – 40°, 40 – 70° y >70° (Figura 4a). La categorización se basó a partir de la reclasificación establecida por la fuente de los datos (Tabla 2). Los valores de ponderación de esta y del resto de variables se detallan en los resultados.

Formaciones Geológicas

Las formaciones geológicas, dependiendo de la litología, permeabilidad y de la consolidación del terreno, influirán en gran medida en la probabilidad a los deslizamientos (Althuwaynee y Pradhan, 2017; Salehpour Jam y col., 2021). Para el desarrollo de esta capa temática, se registraron un total de siete formaciones geológicas, depósitos aluviales, depósitos coluviales y otros (sin descripción) a lo largo de la carretera de interés (Figura 4b). La categorización se basó en observaciones de las formaciones y depósitos recientes.

Distancia a Fallas

Las zonas con fallas activas son susceptibles a deslizamientos (Demir y col., 2013; Ozdemir, 2020). Las áreas más cercanas a esta zona tienen mayor probabilidad de ocurrencia a deslizamientos, debido al intenso cizallamiento. Para el desarrollo de esta capa temática, las distancias a la falla se categorizaron en cinco clases: $<$ 200 m, 200 – 400 m, 400 – 600 m, 600 – 1000 m y $>$ 1000 m (Figura 4c). Esta categorización se basó en las observaciones de afloramientos afectados por las zonas de falla, los cuales aparecieron hasta los 1000 m. De igual forma, las fallas presentes en el área de estudio corresponden a fallas cuaternarias, aproximadamente $<$ 1,8 Ma.

Distancia a Carretera

Las carreteras situadas en zonas de taludes promueve la existencia de una mayor susceptibilidad a deslizamientos, debido a la presencia de infraestructuras, proceso de colonización, aparición de nuevos asentamientos y conexiones con otras carreteras (Igwe y col., 2020; Panchal y Shrivastava, 2020). Durante los trabajos de campo, se evidenció que, a causa de estos cuatro factores, existieron afloramientos afectados situados hasta 750 m de la línea de carretera. Por tal motivo, esta capa temática se categorizó en cuatro clases: $<$ 250 m, 250 – 500 m, 500 – 750 m y $>$ 750 m (Figura 4d).

Distancia a Ríos

Los ríos erosionan el terreno favoreciendo así los deslizamientos de suelo (Achour y col., 2017; Tešić y col., 2020). En el campo se evidenciaron deslizamientos ubicados hasta 750 m, medidos desde el margen de los ríos. Se produjo un mayor número de deslizamientos cerca de los ríos y una mayor masa desplazada, en comparación con regiones más distantes donde hubo menor número de deslizamientos. Por lo tanto, para esta capa temática, los ríos se categorizaron en cinco clases: $<$ 50 m, 50 – 250 m, 250 – 500 m, 500 – 750 m y $>$ 750 m (Figura 4e).

Cobertura y Uso de la Tierra (CUT)

La CUT es una variable importante que interviene en procesos de deslizamientos. La remoción de bosques para convertirlos en pastizales, zonas agrícolas o en zonas de expansión urbana, intensifica la erosión y flujo de caudales cuando existe precipitación. Estos acontecimientos favorecen en gran medida a la ocurrencia de deslizamientos del terreno (Guevara, Carbajal y Tuxpan Vargas, 2020; Roccati y col., 2021). Para el desarrollo de esta última capa temática se registraron cinco categorías de uso de tierra: Agricultura, Área sin Cobertura Vegetal, Bosque, Vegetación Arbustiva y Zona Antrópica (Figura 4f). Los cuerpos de agua fueron excluidos, ya que se analizaron en la variable de distancia a ríos.

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

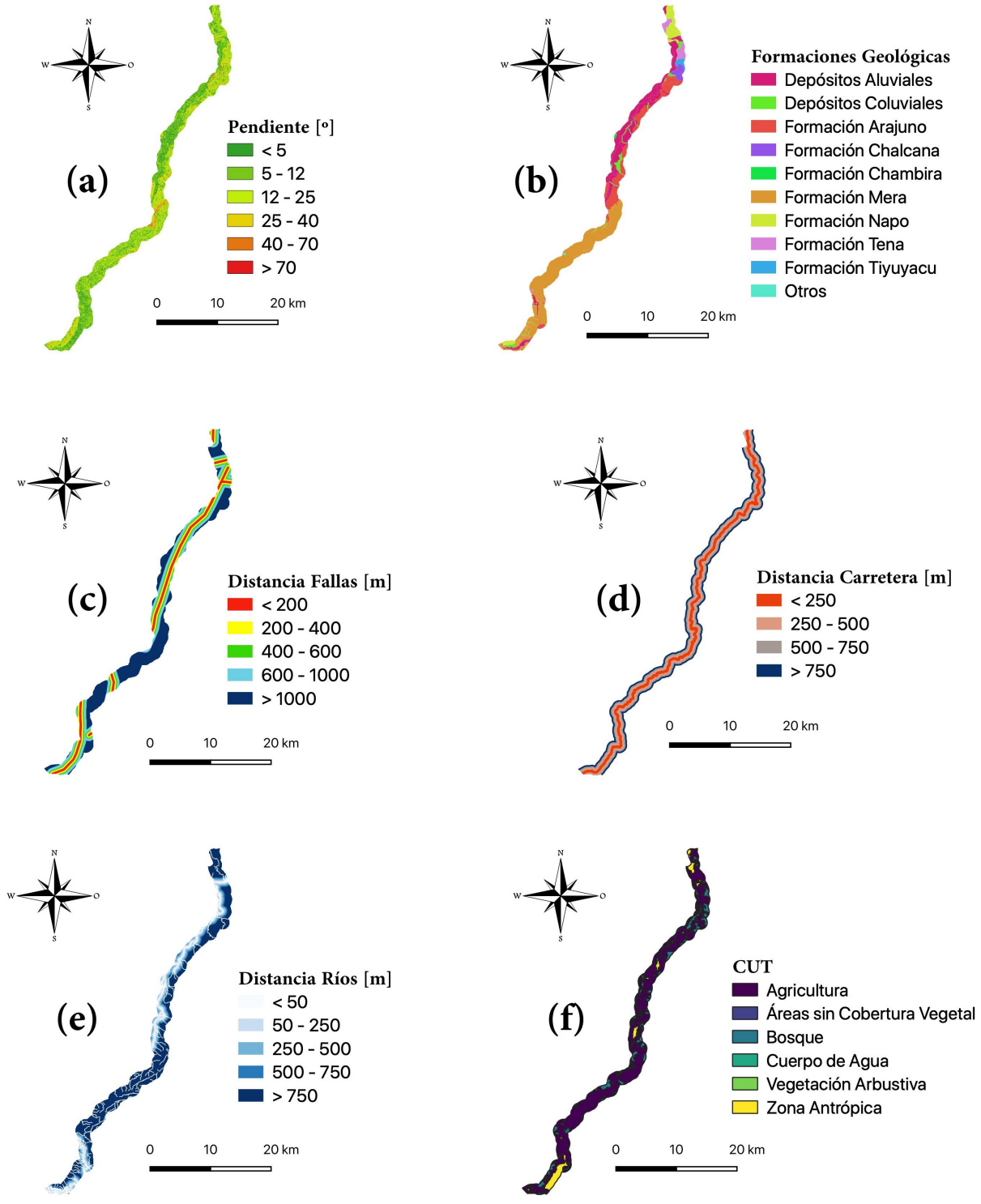

Figura 4. Capas temáticas de las variables a lo largo de la carretera Puyo– Tena: (a) Pendiente, (b) Formaciones Geológicas, (c) Distancia a Fallas, (d) Distancia a Carretera, (e) Distancia a Ríos y (f) CUT.

LA GRANJA: *Revista de Ciencias de la Vida* 39(1) 2024:116-136.
©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

3.3 Cartografía de Susceptibilidad

Para la aplicación del método AHP es indispensable asignar un peso relativo a las variables. Los cálculos matemáticos para obtener los valores de cada paso del AHP se realizaron utilizando el software RStudio. A continuación, se describen en detalle los pasos utilizados. a) Desarrollo de la estructura jerárquica de las variables. b) Matriz de juicios por comparación de pares. Ponderación relativa de acuerdo a la Tabla 3 (Saaty, 1977). Aplicando el criterio de esta tabla, se decidió qué variable es más influyente con relación a otra variable. Se estableció la prioridad y se ponderaron las seis variables. c) Síntesis de juicios comparativos. Cálculo de la prioridad final de cada variable de acuerdo a la tabla (Saaty, 1977). En este punto se obtuvo la ponderación final normalizada de cada variable, determinando así cuánto aportaron las variables para cumplir con el objetivo. d) Evaluación de Consistencia. Permitió verificar si las ponderaciones de los juicios comparativos tuvieron lógica. e) Combinación de capas temáticas y obtención del modelo cartográfico de susceptibilidad. f) Reclasificación del modelo cartográfico final de susceptibilidad.

Tabla 3. Escala fundamental de Saaty (1977).

Valor	Definición	Explicación
1	Igual de importancia	Dos elementos de decisión influyen por igual en el elemento de decisión principal.
3	Moderadamente más importante	Un elemento de decisión es moderadamente más influyente que otro.
5	Mucho más importante	Un elemento de decisión tiene más influencia que otro.
7	Muchísimo más importante	Un elemento de decisión tiene una influencia significativamente mayor que el otro.
9	Extremadamente más importante	La diferencia de decisión entre las influencias de los dos elementos de decisión es extremadamente significativa.
2, 4, 6, 8	Valores de juicios intermedios	Valores de juicio entre igual, moderadamente, mucho y extremadamente

Una vez realizada las ponderaciones, empleando el cálculo de coherencia o radio de coherencia (*CR*), se determinó si el cálculo concluyó correctamente o no, descrita en la Ec (1). Así fue posible reconocer si hubo coherencia o no en la comparación de rango de importancia de cada variable.

$$CR = \frac{CI}{RI} \tag{1}$$

Donde, *RI* (Tabla 4) se refiere al índice de consistencia aleatorio; en cambio, *CI* se refiere al índice de consistencia descrito en la Ec (2). El *RI* es un valor definido que es parte del método AHP.

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \tag{2}$$

Donde, λ_{max} es el valor propio máximoy se calcula a partir de la matriz y n es el orden de la matriz. Según Saaty (1990), la relación de coherencia debe ser menor o igual a 10% o una imprecisión inferior a 10%. El principio consiste en comparar el juicio con la comparación aleatoria de los elementos. Finalmente, las ponderaciones integraron las distintas clases causales en un único índice de susceptibilidad a los deslizamientos, LSI, utilizando la Ec (3) (Saaty, 1990).

$$LSI = \sum_{i=1}^{n} R_i * W_i \tag{3}$$

Donde, R_i son las clases de clasificación de cada variable y W_i son las ponderaciones para cada una de las variables condicionantes de los deslizamientos. El modelo cartográfico *LSI* resultante se reclasificó en cinco clases de susceptibilidad: muy baja, baja, moderada, alta y muy alta. Estas cinco divisiones se realizaron de acuerdo al método de cuantiles, utilizando los valores de los píxeles del modelo car-

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

tográfico final de susceptibilidad a los deslizamientos.

3.4 Validación del Modelo Cartográfico

Una validación adecuada se obtiene comparando el modelo cartográfico final, desarrollado a partir del método AHP, con el mapa de inventario de deslizamientos (Basu y Pal, 2020; Ozdemir, 2020). La validación se realizó mediante el método de la Curva de Características Operativas del Receptor (ROC por sus siglas en inglés Receiver Operating Characteristics), el cual ha sido ampliamente utilizado para este tipo de estudios (Igwe y col., 2020; Bahrami, Hassani y Maghsoudi, 2021; Salehpour Jam y col., 2021; Kincal y Kayhan, 2022).

La curva ROC se utiliza para mostrar gráficamente la correlación entre la tasa de verdaderos positivos y la tasa de falsos positivos (Soeters y Van Westen, 1996; Williams y col., 1999; Althouse, 2016). En el área bajo la curva (AUC por sus siglas en inglés Area Under the Curve) de la curva ROC, mientras más próxima se encuentre a 1,0 tendrá una mayor predicción del modelo cartográfico; en cambio, mientras más cercano esté a 0,5 el modelo carecerá de confiabilidad ya que tendrá una predicción aleatoria.

Tabla 4. Índice de Consistencia Aleatorio de Saaty (1990).

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0	0	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

4 Resultados

4.1 Proceso de Jerarquía Analítica

El desarrollo de la jerarquización y comparación de pares permitió conocer el grado de influencia de las variables en los procesos de deslizamientos del suelo (Tabla 5). Las variables más destacadas fueron pendiente, formaciones geológicas, distancias a ríos y cobertura y uso de la tierra, mientras que las menos influyentes fueron distancias a carretera y fallas. El análisis del radio de coherencia para cada variable y para el modelo cartográfico final de susceptibilidad obtuvieron un valor inferior a 0,10 (Tabla 5 y Tabla 6). Estos valores reflejan que el procedimiento AHP fue realizado correctamente. Tras el desarrollo de la jerarquización, comparación de pares, juicios comparativos y evaluación de consistencia se obtuvo la matriz final con las ponderaciones de las seis variables para realizar el modelo final de susceptibilidad a los deslizamientos (Tabla 6).

El modelo final de susceptibilidad a deslizamientos se reclasificó en cinco clases: muy baja, baja, moderada, alta y muy alta (Figura 5). Con base en los datos de la (Tabla 7), los porcentajes del área de susceptibilidad fueron muy baja (0,64%), baja (31,96%), moderada (50,87%), alta (15,83%) y muy alta (0,70%). Una vez culminado el modelo, se encontró que en la carretera Puyo-Tena existen quince regiones con clases de susceptibilidad alta y muy alta (Figura 5 y Tabla 8), donde cuatro de ellas se encuentran cerca de los poblados de Puyo, Santa Clara, Arosemena Tola y Puerto Napo. Las quince regiones fueron seleccionadas tras la observación y análisis del modelo final. Los deslizamientos inventariados se colocaron sobre el modelo cartográfico final y gran parte de ellos se situaron dentro de estas quince regiones de alta y muy alta susceptibilidad a los deslizamientos.

4.2 Validación del Modelo Cartográfico

Se utilizó la librería "ROCR" del paquete "ROCR" en el software RStudio para evaluar la precisión de nuestro modelo cartográfico de susceptibilidad a los deslizamientos. El análisis de la curva ROC reveló un AUC de 0,837 lo que indica una precisión de predicción de 83,7% (Figura 6). Esta métrica es una medida confiable para evaluar el rendimiento del modelo en la predicción de los deslizamientos.

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Tabla 5. Matriz de jerarquización y comparación de pares de las variables.

Variables	Categorías	Ponderación Categorías	Ponderación Variables	Pesos Categorías	CR Variables
Formaciones Geológicas	Depósito Aluvial	2	7	0,039	0,0032
	Formación Tena	8		0,154	
	Formación Mera	7		0,135	
	Formación Arajuno	8		0,154	
	Formación Chambira	6		0,115	
	Formación Napo	5		0,097	
	Formación Tiyuyacu	6		0,115	
	Formación Chalcana	5		0,097	
	Depósito Coluvial	4		0,077	
	Otros	1		0,020	
Fallas	<200	9	2	0,359	0,0011
	200 – 400	7		0,280	
	400 – 600	5		0,199	
	600 – 1000	3		0,120	
	>1000	1		0,039	
Pendiente	<5°	1	9	0,039	0,0028
	5 – 12°	2		0,077	
	12 – 25°	4		0,154	
	25 – 40°	5		0,193	
	40 – 70 °	8		0,308	
	>70°	6		0,230	
Distancia a Carretera	<250	7	3	0,411	0,0033
	250 – 500	5		0,294	
	500 – 750	3		0,176	
	>750	2		0,118	
Distancia a Ríos	<50	9	6	0,375	0,0017
	50 – 250	7		0,292	
	250 – 500	4		0,167	
	500 – 750	3		0,125	
	>750	1		0,043	
CUT	Agricultura	7	5	0,368	0,0039
	Área sin Cobertura Vegetal	1		0,053	
	Bosque	4		0,211	
	Vegetación Arbustiva	5		0,263	
	Zona Antrópica	2		0,105	

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Tabla 6. Matriz de comparación de pares y ponderación final de cada variable causante de deslizamientos de tierra.

	Matriz de Comparación de Pares						Ponderación	CR Final
	Pendiente	Formaciones Geológicas	Ríos	CUT	Carretera	Fallas		
Pendiente	1,00						0,281	0,0039
Formaciones Geológicas	0,78	1,00					0,219	
Ríos	0,67	0,86	1,00				0,187	
CUT	0,56	0,72	0,84	1,00			0,157	
Carretera	0,34	0,43	0,50	0,60	1,00		0,094	
Fallas	0,23	0,29	0,34	0,40	0,67	1,00	0,063	

5 Discusión

En esta investigación se utilizó el método AHP basado en SIG como método de evaluación multicriterio para identificar zonas con susceptibilidad a los deslizamientos en la carretera Puyo– Tena. Los datos presentados de las seis variables muestran cómo influyen en la susceptibilidad a los deslizamientos a lo largo de la carretera de estudio; situación similar en los estudios de Hepdeniz (2020) y Chanu y Bakimchandra (2022). A raíz de la jerarquización, ponderación de pares, juicios comparativos y el valor obtenido en el radio de consistencia (CR $<$ 0,1) se conoció que las ponderaciones efectuadas en las variables son confiables y que fueron realizadas correctamente. Además, con la validación del modelo cartográfico mediante el área bajo la curva AUC de la curva ROC se obtuvo 0,837, lo que nos permite respaldar que la calidad del modelo desarrollado de susceptibilidad a los deslizamientos cuenta con la característica de ser muy buena (Roy y Saha, 2019; Sonker, Tripathi y Singh, 2021).

En comparación con estudios similares realizados en carreteras de otros países, se observaron resultados diferentes a los obtenidos en esta investigación. La carretera de India estudiada por Panchal y Shrivastava (2022) presentó un valor cercano al de nuestro estudio, con un AUC de 0,825. Por otro lado, la carretera de China-Pakistán estudiada por Ali y col. (2019), obtuvo un AUC de 0,72, mientras que la carretera estudiada en Argelia por Achour y col. (2017), consiguió un valor de AUC de 0,66. Esta breve comparación revela la variabilidad de los valores de AUC en estudios realizados en diferentes regiones del mundo. Dicha variación estará relacionada con el número de deslizamientos inventariados y la calidad del modelo cartográfico final de la susceptibilidad a los deslizamientos. De acuerdo con al buffer de 1000 m analizado a lo largo de la carretera de estudio, un 16,53 % (25,38 km^2) corresponden a regiones potenciales para deslizamientos de tierra repartido 15,83 % (24,31 km) en alta y 0,70 % (1,07 km) en muy alta susceptibilidad. El resto, aproximadamente 83,57 % (128,14 km^2) de la carretera, no representa gran riesgo para una posible eventualidad a deslizamientos.

Tabla 7. Áreas de las categorías del modelo cartográfico de susceptibilidad a los deslizamientos.

Categorías de Susceptibilidad	Área [km^2]	Área [%]
Muy Baja	0,97	0,64
Baja	49,07	31,96
Moderada	78,10	50,87
Alta	24,31	15,83
Muy Alta	1,07	0,70
Total	153,52	100 %

Conforme al modelo cartográfico LSI de susceptibilidad a los deslizamientos (Figura 5) y los datos que muestra la Tabla 8, aproximadamente 17 km de los aproximadamente 80 km que son de la carretera Puyo– Tena son susceptibles a deslizamientos, es decir, un 21,25 % de la carretera tiene peligro a deslizamientos de tierra. Una vez analizadas las variables *in situ* y digitalmente, se determinó que las cuatro variables más importantes en intervenir en procesos de deslizamientos en este sitio de estudio son: pendiente, formaciones geológicas, distancias a ríos y CUT; por el contrario, las dos variables restantes distancia a carretera y distancia a fallas, son las que tienen menos influencia. Para esta investigación las variables analizadas tienen esta jerarquía, pero como mencionan He y Beighley (2008),

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

quizás en otras condiciones y otra zona de estudio, las variables menos influyentes podrían ser más determinantes. Por ejemplo, si una carretera en construcción está atravesando montañas pronunciadas (Pourghasemi, Pradhan y Gokceoglu, 2012), o si la zona de estudio está cerca de zonas de fallas activas causante de terremotos (Abedini, Ghasemyan y Rezaei, 2017), serían las principales variables para la susceptibilidad a deslizamientos.

Tabla 8. Principales regiones de la carretera Puyo-Tena con susceptibilidad alta y muy alta a los deslizamientos.

Región	km [Inicio]	Coordenadas Grado-Decimal		km [Fin]	Coordenadas Grado-Decimal	
		Longitud	Latitud		Longitud	Latitud
1	0,125	-78,0500	-1,5088	3,692	-78,0236	-1,4993
2	14,163	-77,9987	-1,4235	14,275	-77,9988	-1,4225
3	29,018	-77,9238	-1,3486	29,329	-77,9224	-1,3465
4	36,498	-77,8880	-1,3119	36,765	-77,8858	-1,3111
5	38,933	-77,8822	-1,2963	39,679	-77,8840	-1,2914
6	41,097	-77,8897	-1,2853	42,424	-77,8898	-1,2746
7	44,583	-77,8886	-1,2569	48,331	-77,8821	-1,2304
8	56,780	-77,8547	-1,1634	57,653	-77,8511	-1,1568
9	59,150	-77,8425	-1,1470	60,820	-77,8328	-1,1361
10	63,517	-77,8169	-1,1197	63,938	-77,8137	-1,1217
11	66,121	-77,8053	-1,1076	66,700	-77,8018	-1,1042
12	67,864	-77,7920	-1,1051	68,886	-77,7947	-1,0973
13	70,238	-77,7901	-1,0871	70,937	-77,7916	-1,0812
14	72,836	-77,7904	-1,0657	73,655	-77,7912	-1,0597
15	75,536	-77,7966	-1,0459	76,381	-77,7951	-1,0391

Con base en los resultados, se determina que existen quince regiones de la carretera con gran probabilidad de deslizamientos (Figura 5 y Tabla 8). La mayoría de estas regiones se ubican fuera de los principales poblados a excepción de las regiones 1, 6, 8 y 15 que se localizan cerca de los poblados de Puyo, Santa Clara, Arosemena Tola y Puerto Napo, respectivamente. A pesar de la cercanía, esto no representa un riesgo latente a los habitantes de estos sectores. Para este estudio, la pendiente es la variable más importante debido a que la mayoría de los deslizamientos inventariados muestran rasgos de ser influenciados por la inclinación del afloramiento; escenario similar en los estudios de Dolui, Yuvaraj y Geetha (2019) y Bahrami, Hassani y Maghsoudi (2021).

La mayoría de los deslizamientos se encuentran en zonas con pendientes $> 40°$, específicamente en el rango de $40° - 70°$. Las formaciones geológicas se consideran la segunda variable de incidencia importante, ya que su constitución litológica, resistencia geomecánica y porosidad intervienen en la ocurrencia a los deslizamientos. Las condiciones físicas de cada formación geológica influyen de distinta manera para la aparición de deslizamientos. Formaciones geológicas como Chambira, Tiyuyacu, Mera, Tena y Arajuno, cuentan con litología porosa, baja resistencia geomecánica y con poca resistencia a la permeabilidad; por tal razón, cuentan con gran número de deslizamientos. Los ríos son la tercera variable importante. Los distintos ríos atraviesan diversas zonas de alta y baja pendiente, favoreciendo así la erosión del terreno y pérdida en la resistencia del suelo. La mayoría de deslizamientos se encontraron cerca de los ríos grandes y pequeños, lo que da una clara idea que es una variable importante en procesos de deslizamientos. Por último, la CUT también se considera una variable importante. El cambio del uso de la tierra provoca que el suelo se degrade, pierda resistencia mecánica y ocasione mayor infiltración de agua y por tanto sea más susceptible a deslizamientos. Todos estos aspectos son influenciados por actividades antrópicas que se ob-

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

servan claramente a lo largo de la carretera Puyo-Tena. En cambio, la distancia a la carretera y la distancia a fallas son las que menos influyen en los deslizamientos del terreno. La carretera Puyo – Tena, al ser asfaltada, tiene gran ocurrencia de tránsito, pero los movimientos originados por vehículos o actividades humanas, no influyen en gran proporción para que haya deslizamientos.

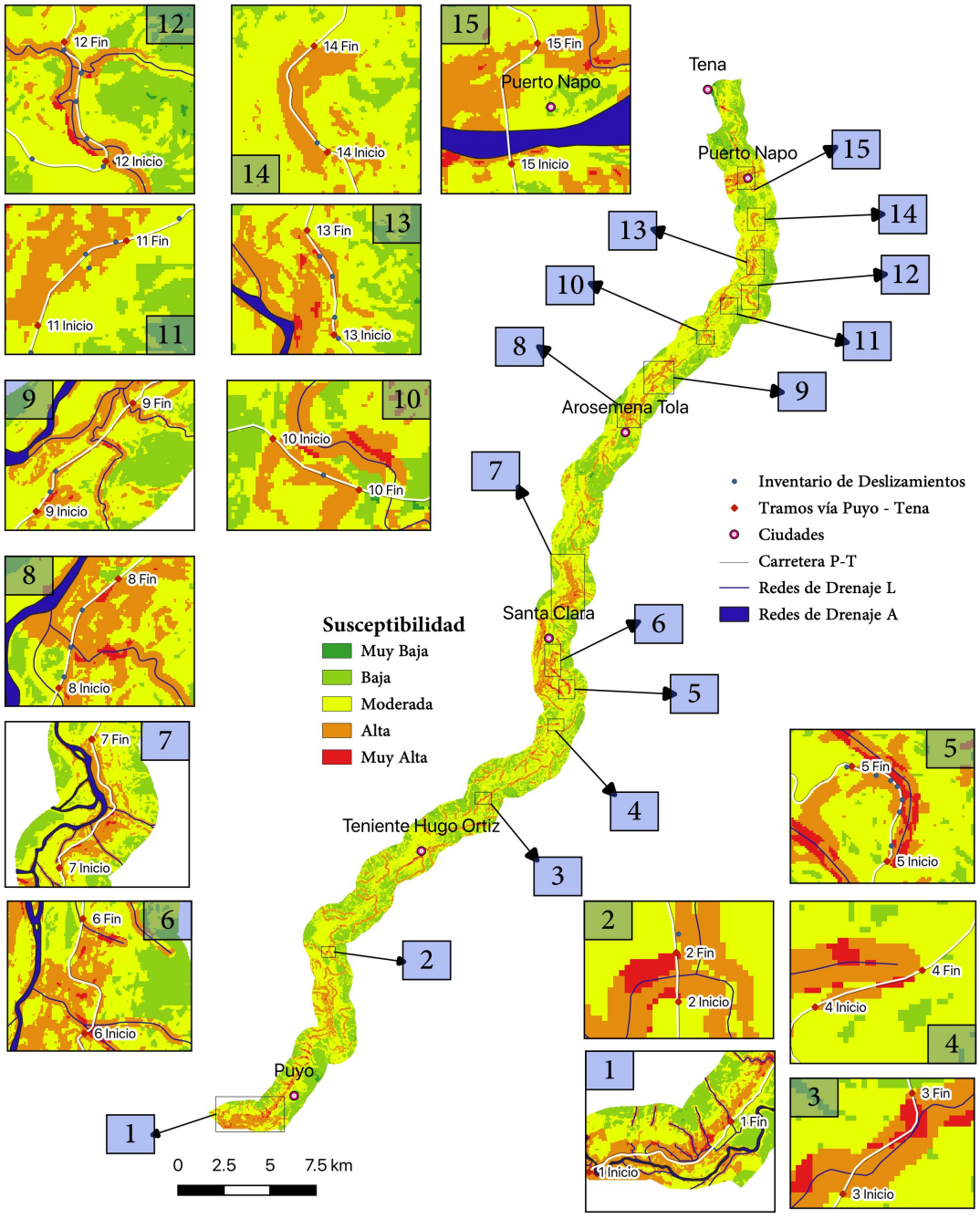

Figura 5. Modelo cartográfico LSI de Susceptibilidad a los Deslizamientos usando el método AHP. Regiones de la carretera Puyo-Tena.

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Las fallas geológicas son detonantes de sismos, los cuales generan movimientos de terreno. Los sismos en la Amazonía han sido menores en cantidad, en comparación a otras regiones del país, además las afectaciones han sido leves (Rivadeneira y col., 2007). Hasta la actualidad, en la carretera de estudio estos sismos son de baja magnitud con poca periodicidad y no tiene gran repercusión para deslizamientos. Por tal razón, estas dos variables son las que menos influyen para la ocurrencia de deslizamientos en la zona de estudio.

Por último, en décadas recientes se han desarrollado nuevos métodos cartográficos para el análisis de susceptibilidad a deslizamientos como regresión logística, redes neuronales, *machine learning* y AHP. El método AHP se basa a partir de inventarios de deslizamientos y análisis estadísticos, multicriterio, criterio del experto, jerarquización, entre otros. Se tomaron en cuenta seis variables que están presentes de manera habitual en procesos de deslizamientos de tierra. La jerarquización de cada una de ellas estuvo sujeta al inventario de deslizamientos y al conocimiento del área de estudio. A partir de los cuatro principios del método AHP se logró obtener un modelo cartográfico LSI de susceptibilidad a los deslizamientos, y así determinar las principales regiones susceptibles a los deslizamientos de tierra de la carretera Puyo-Tena.

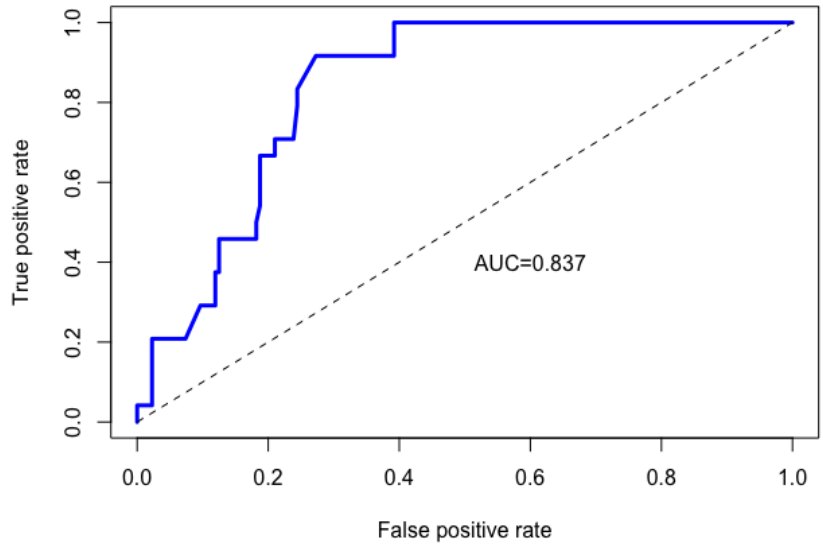

Figura 6. Curva ROC del modelo cartográfico de susceptibilidad a los deslizamientos usando el método AHP.

6 Conclusiones

La susceptibilidad a los deslizamientos en la carretera Puyo-Tena, evaluada mediante el método AHP, permitió una rápida y práctica manipulación de los datos físicos del área de estudio. El modelo cartográfico LSI de susceptibilidad se obtuvo mediante la jerarquización, ponderación y digitalización de las seis variables que intervinieron en la investigación. La validación a través del método AUC/ROC dio un valor de 0,837 correspondiente a una precisión de predicción de 83,7 %. Este valor respaldó la calidad del modelo cartográfico desarrollado con la característica de ser muy bueno. La aplicación del método AHP permitió identificar las variables de mayor influencia, las cuales fueron pendiente, formaciones geológicas, distancias a ríos y cobertura y uso de la tierra. De primera mano, el modelo LSI de susceptibilidad a los deslizamientos se reclasificó en cinco clases de susceptibilidad obteniendo superficies de 0,64 %, 31,96 %, 50,87 %, 15,83 % y 0,70 % para las clases de muy baja, baja, moderada, alta y muy alta, respectivamente. Se determinó que aproximadamente 17 km de los aproximadamente 80 km que son de la carretera Puyo – Tena son susceptibles a

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

deslizamientos, es decir, un 21,25% de la carretera posee potencial a deslizamientos de tierra. Además, se conoció que la carretera estudiada cuenta con 15 regiones entre alta y muy alta probabilidad para la ocurrencia de deslizamientos. Estas regiones se situaron sobre zonas de alta pendiente, litología porosa y permeable, gran cantidad de ríos y suelos aptos para la agricultura. De igual forma, las regiones 1, 6, 8 y 15 se situaron cerca a los poblados de Puyo, Santa Clara, Arosemena Tola y Puerto Napo, respectivamente. Estas regiones, a pesar de su cercanía a los poblados en mención, aparentemente no representan un riesgo para los habitantes del sector.

El modelo cartográfico de susceptibilidad a deslizamientos proporciona información coincidente con el inventario de deslizamientos levantado en campo. Este modelo puede ser manejado por instituciones gubernamentales o no gubernamentales que tienen como fin la planificación del uso de tierra, planificación y gestión del territorio o fines similares. El modelo de susceptibilidad permitirá tomar decisiones para evitar posibles peligros que atenten contra la vida y bienestar de la población, planificar una eficiente red vial, considerar las mejores opciones para la expansión urbana y rural; inclusive, desarrollar políticas de construcción aledañas a las vías.

Contribución de los autores

CJCQ; Conceptualización, Curación de datos, Análisis formal, Adquisición de financiación, Investigación, Metodología, Administración de proyecto, Recursos, Software, Supervisión, Validación, Visualización, Escritura-borrador original y Escritura–revisión y edición. JREC; Conceptualización, Curación de datos, Análisis formal, Adquisición de financiación, Investigación, Metodología, Administración de proyecto, Supervisión, Validación, Escritura-borrador original y Escritura-revisión y edición. BGVC; Conceptualización, Curación de datos, Análisis formal, Investigación, Metodología, Supervisión y Validación. MVST; Conceptualización, Investigación y Metodología. JSAS; Conceptualización, Investigación y Metodología. ECCB; Investigación, Recursos, Software, Escritura-borrador original, Escritura–revisión y edición. ADOC; Investigación, Recursos y Software.

Referencias

Abedini, M., B. Ghasemyan y M. Rezaei (2017). «Landslide susceptibility mapping in Bijar city, Kurdistan Province, Iran: a comparative study by logistic regression and AHP models». En: *Environmental earth sciences* 76, 1-14. Online:https://n9.cl/ghgby.

Achour, Y. y col. (2017). «Landslide susceptibility mapping using analytic hierarchy process and information value methods along a highway road section in Constantine, Algeria». En: *Arabian Journal of Geosciences* 10, 1-16. Online:https://n9.cl/ggext0.

Ali, S. y col. (2019). «Landslide susceptibility mapping by using a geographic information system (GIS) along the China–Pakistan Economic Corridor (Karakoram Highway), Pakistan». En: *Natural Hazards and Earth System Sciences* 19.5, 999-1022. Online:https://n9.cl/3qz9h.

Althouse, A. (2016). «Statistical graphics in action: making better sense of the ROC curve». En: *International Journal of Cardiology* 215, 9-10. Online:https://n9.cl/hipk6.

Althuwaynee, O. y B. Pradhan (2017). «Semi-quantitative landslide risk assessment using GIS-based exposure analysis in Kuala Lumpur City». En: *Geomatics, Natural Hazards and Risk* 8.2, 706-732. Online:https://n9.cl/44j52.

Asmare, D. (2023). «Application and validation of AHP and FR methods for landslide susceptibility mapping around choke mountain, northwestern ethiopia». En: *Scientific African* 19, e01470. Online:https://n9.cl/7vjlh.

Bahrami, Y., H. Hassani y A. v Maghsoudi (2021). «Landslide susceptibility mapping using AHP and fuzzy methods in the Gilan province, Iran». En: *GeoJournal* 86, 1797-1816. Online:https://n9.cl/frz7v.

Barella, C., F. Sobreira y J. Zêzere (2019). «A comparative analysis of statistical landslide susceptibility mapping in the southeast region of Minas Gerais state, Brazil». En: *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 78, 3205-3221. Online:https://n9.cl/z8lcl2.

Basu, T. y S. Pal (2020). «A GIS-based factor clustering and landslide susceptibility analysis using AHP for Gish River Basin, India». En: *Environment, development and sustainability* 22, 4787-4819. Online:https://n9.cl/uh67s2.

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Benchelha, S. y col. (2020). «Landslide susceptibility mapping in the commune of Oudka, Taounate Province, North Morocco: A comparative analysis of logistic regression, multivariate adaptive regression spline, and artificial neural network models». En: *Environmental & Engineering Geoscience* 26.2, 185-200. Online:https://n9.cl/fxlus.

Bien, T. y col. (2022). «Landslide susceptibility mapping at sin Ho, Lai Chau province, Vietnam using ensemble models based on fuzzy unordered rules induction algorithm». En: *Geocarto International* 37.27, 17777-17798. Online:https://bit.ly/3QWPHxw.

Bragagnolo, L., R. da Silva y J. Grzybowski (2020). «Landslide susceptibility mapping with r. landslide: A free open-source GIS-integrated tool based on Artificial Neural Networks». En: *Environmental Modelling & Software* 123, 104565. Online:https://n9.cl/2lss7i.

Bravo-López, E. y col. (2022). «Landslide susceptibility mapping of landslides with artificial neural networks: Multi-approach analysis of backpropagation algorithm applying the neuralnet package in Cuenca, Ecuador». En: *Remote Sensing* 14.14, 3495. Online:https://n9.cl/zihph.

Bravo, C. y col. (2017). «Indicadores morfológicos y estructurales de calidad y potencial de erosión del suelo bajo diferentes usos de la tierra en la Amazonía ecuatoriana». En: *Anales de Geografia de la Universidad Complutense* 37.2, 247-264. Online:https://n9.cl/2lss7i.

Carrara, A. (1983). «Multivariate models for landslide hazard evaluation». En: *Journal of the International Association for Mathematical Geology* 15, 403-426. Online:https://n9.cl/ij7ke.

Chanu, M. y O. Bakimchandra (2022). «Landslide susceptibility assessment using AHP model and multi resolution DEMs along a highway in Manipur, India». En: *Environmental Earth Sciences* 81.5, 156. Online:https://n9.cl/55hjo.

Correo (2017). *Tramos de 21 vías de once provincias siguen cerrados*.

Cruden, D. (1991). «A simple definition of a landslide.» En: *Bulletin of Engineering Geology & the Environment* 43.1, 27-29. Online:https://n9.cl/b5nhdd.

Cruden, D. y D. Varnes (1996). «Landslides: investigation and mitigation». En: Transportation Research Board. Cap. Chapter 3 - Landslide types and processes, págs. 36-75.

Dahal, B. y R. Dahal (2017). «Landslide hazard map: tool for optimization of low-cost mitigation». En: *Geoenvironmental Disasters* 4, 1-9. Online:https://n9.cl/xd5dr.

Dai, F. y col. (2001). «Assessment of landslide susceptibility on the natural terrain of Lantau Island, Hong Kong». En: *Environmental geology* 40, 381-391. Online:https://n9.cl/pktic.

Demir, G. y col. (2013). «A comparison of landslide susceptibility mapping of the eastern part of the North Anatolian Fault Zone (Turkey) by likelihood-frequency ratio and analytic hierarchy process methods». En: *Natural hazards* 65, 1481-1506. Online:https://n9.cl/4vxpj.

Dolui, B., R. Yuvaraj y G. Geetha (2019). «Landslide susceptibility mapping using AHP model in Nilgiri District». En: *Thematics Journal of Geography* 8.12, 189-208. Online:https://n9.cl/vy1ht.

Ecoamazónico (2014). *MTOP atiende inmediatamente los 6 deslizamientos de tierra*.

— (2020). *Reporte de un derrumbe en la vía al Tena*.

— (2021). *Vía habilitada en el Paso Lateral*.

Ercanoglu, M. y C. Gokceoglu (2004). «Use of fuzzy relations to produce landslide susceptibility map of a landslide prone area (West Black Sea Region, Turkey)». En: *Engineering geology* 75.3-4, 229-250. Online:https://n9.cl/gyhr2c.

Feizizadeh, B. y T. Blaschke (2013). «GIS-multicriteria decision analysis for landslide susceptibility mapping: comparing three methods for the Urmia lake basin, Iran». En: *Natural hazards* 65, 2105-2128. Online:https://n9.cl/qlba92.

Gameiro, S., G. de Oliveira y L. Guasselli (2022). «The influence of sampling on landslide susceptibility mapping using artificial neural networks». En: *Geocarto International*, 1-23. Online:https://n9.cl/qiex9x.

Gobierno Cantonal de Pastaza (2020). *Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del cantón Pastaza 2020-2030*. Gobierno Cantonal de Pastaza.

Gobierno Provincial de Napo (2020). *Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial Napo 2020-2023*. Gobierno Provincial de Napo.

Gudiyangada Nachappa, T. y col. (2020). «Comparison and validation of per-pixel and object-based approaches for landslide susceptibility mapping». En: *Geomatics, Natural Hazards and Risk* 11.1, 572-600. Online:https://n9.cl/bxnw9.

Guevara, M. de J., N. Carbajal y J. Tuxpan Vargas (2020). «Soil deterioration in the southern

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Chihuahuan Desert caused by agricultural practices and meteorological events». En: *Journal of Arid Environments* 176, 104097. Online:https://n9.cl/j313s.

Guillen, K. y col. (2022). «Landslide susceptibility analysis based on a semiquantitative method in the sierra-costa region, michoacán, mexico». En: *Physical Geography* 43.4, 463-486. Online:https://n9.cl/84ebbv.

Guzzetti, F. y col. (1999). «Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy». En: *Geomorphology* 31.1-4, 181-216. Online:https://bit.ly/3udcJaq.

Hamza, T. y T. Raghuvanshi (2017). «GIS based landslide hazard evaluation and zonation–A case from Jeldu District, Central Ethiopia». En: *Journal of King Saud University-Science* 29.2, 151-165. Online:https://n9.cl/i8u6e.

Harris, I. y col. (2020). «Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset». En: *Scientific data* 7.1, 109. Online:https://n9.cl/6huao.

He, Y. y R. Beighley (2008). «GIS-based regional landslide susceptibility mapping: a case study in southern California». En: *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group* 33.3, 380-393. Online:https://n9.cl/977ea.

Hearn, G. y A. Hart (2019). «Landslide susceptibility mapping: a practitioner's view». En: *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 78.8, 5811-5826. Online:https://n9.cl/kvril.

Hepdeniz, K. (2020). «Using the analytic hierarchy process and frequency ratio methods for landslide susceptibility mapping in Isparta-Antalya highway (D-685), Turkey». En: *Arabian Journal of Geosciences* 13.16, 795. Online:https://n9.cl/dzcxg.

Igwe, O. y col. (2020). «GIS-based gully erosion susceptibility modeling, adapting bivariate statistical method and AHP approach in Gombe town and environs Northeast Nigeria». En: *Geoenvironmental Disasters* 7, 1-16. Online:https://n9.cl/9d7nz.

Jamir, M. y col. (2022). «Landslide susceptibility mapping of Noklak Town, Nagaland, Northeast India using bivariate statistical method». En: *Geological Journal* 57.12, 5250-5264. Online:https://n9.cl/q0qdk.

Kincal, C. y H. Kayhan (2022). «A combined method for preparation of landslide susceptibility map in Izmir (Türkiye)». En: *Applied Sciences* 12.18, 9029. Online:https://n9.cl/u3cks.

Klimeš, J. y V. Rios Escobar (2010). «A landslide susceptibility assessment in urban areas based on existing data: an example from the Iguaná Valley, Medellín City, Colombia». En: *Natural Hazards and Earth System Sciences* 10.10, 2067-2079. Online:https://n9.cl/v4r15.

Komac, M. (2006). «A landslide susceptibility model using the analytical hierarchy process method and multivariate statistics in perialpine Slovenia». En: *Geomorphology* 74.1-4, 17-28. Online:https://n9.cl/gw7og.

Laraque, A. y col. (2004). «ediment Transfer through the fluvial system». En: vol. 288. IAHS. Cap. Sediment yields and erosion rates in the Napo River Basin: an Ecuadorian Andean Amazon tributary, 220-225. Online:https://bit.ly/3MH0nOd.

Lee, S. y K. Min (2001). «Statistical analysis of landslide susceptibility at Yongin, Korea». En: *Environmental Geology* 40.9, 1095-1113. Online:https://bit.ly/3tzABol.

Mallick, J. y col. (2018). «GIS-based landslide susceptibility evaluation using fuzzy-AHP multicriteria decision-making techniques in the Abha Watershed, Saudi Arabia». En: *Environmental Earth Sciences* 77, 1-25. Online:https://n9.cl/uuy8p.

Mansouri Daneshvar, M. (2014). «Landslide susceptibility zonation using analytical hierarchy process and GIS for the Bojnurd region, northeast of Iran». En: *Landslides* 11.6, 1079-1091. Online:https://n9.cl/2azojx.

Ministerio del Ambiente de Ecuador (2014). *Sistema de Clasificación de Ecosistemas del Ecuador Continental*. Ministerio del Ambiente de Ecuador.

Nguyen, V. y col. (2019). «Hybrid machine learning approaches for landslide susceptibility modeling». En: *Forests* 10.2, 157. Online:https://n9.cl/2i4cc.

Nhu, V. y col. (2020). «Shallow landslide susceptibility mapping: A comparison between logistic model tree, logistic regression, naïve bayes tree, artificial neural network, and support vector machine algorithms». En: *International journal of environmental research and public health* 17.8, 2749. Online:https://n9.cl/am82bp.

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Nicu, I. y A. Asăndulesei (2018). «GIS-based evaluation of diagnostic areas in landslide susceptibility analysis of Bahluieț River Basin (Moldavian Plateau, NE Romania). Are Neolithic sites in danger?» En: *Geomorphology* 314, 27-41. Online:https://n9.cl/71hsz.

Nilsen, T. y col. (1979). *Relative slope stability and land-use planning. Selected examples from the San Francisco Bay region, California*. Ministerio del Ambiente de Ecuador.

Obras Públicas Ecuador (2022). *Trabajamos con maquinaria y personal en coordinación con @GadPastaza y GAD de Santa Clara debido a un deslizamiento en el sector*.

Okoli, J. y col. (2023). «High-Resolution Lidar-Derived DEM for Landslide Susceptibility Assessment Using AHP and Fuzzy Logic in Serdang, Malaysia». En: *Geosciences* 13.2, 34. Online:https://n9.cl/43tlc.

Orejuela, I. y T. Toulkeridis (2020). «Evaluation of the susceptibility to landslides through diffuse logic and analytical hierarchy process (AHP) between Macas and Riobamba in Central Ecuador». En: *2020 Seventh International Conference on eDemocracy y eGovernment (ICEDEG)*, págs. 201-207.

Ortiz, J. y A. Martínez-Graña (2018). «A neural network model applied to landslide susceptibility analysis (Capitanejo, Colombia)». En: *Geomatics, Natural Hazards & Risk* 9.1, 1106-1128. Online:https://n9.cl/hg8r7.

Ozdemir, A. (2020). «A comparative study of the frequency ratio, analytical hierarchy process, artificial neural networks and fuzzy logic methods for landslide susceptibility mapping: Taşkent (Konya), Turkey». En: *Geotechnical and Geological Engineering* 38, 4129-4157. Online:https://n9.cl/w77582.

Ozturk, D. y N. Uzel-Gunini (2022). «Investigation of the effects of hybrid modeling approaches, factor standardization, and categorical mapping on the performance of landslide susceptibility mapping in Van, Turkey». En: *Natural Hazards* 114.3, 2571-2604. Online:https://n9.cl/f0ct7.

Panchal, S. y A. Shrivastava (2020). «Application of analytic hierarchy process in landslide susceptibility mapping at regional scale in GIS environment». En: *Journal of Statistics and Management Systems* 23.2, 199-206. Online:https://n9.cl/7uzpk.

— (2022). «Landslide hazard assessment using analytic hierarchy process (AHP): A case study of National Highway 5 in India». En: *Ain Shams Engineering Journal* 13.3, 101626. Online:https://n9.cl/b2pkh.

Pham, Q. y col. (2021). «A comparison among fuzzy multi-criteria decision making, bivariate, multivariate and machine learning models in landslide susceptibility mapping». En: *Geomatics, Natural Hazards and Risk* 12.1, 1741-1777. Online:https://n9.cl/719xzd.

Pourghasemi, H., B. Pradhan y C. Gokceoglu (2012). «Application of fuzzy logic and analytical hierarchy process (AHP) to landslide susceptibility mapping at Haraz watershed, Iran». En: *Natural hazards* 63, 965-996. Online:https://n9.cl/l2h6a.

Pourghasemi, H. y col. (2018). «Analysis and evaluation of landslide susceptibility: a review on articles published during 2005–2016 (periods of 2005-2012 and 2013-2016)». En: *Arabian Journal of Geosciences* 11, 1-12. Online:https://n9.cl/06bsn.

Raghuvanshi, T., J. Ibrahim y D. Ayalew (2014). «Slope stability susceptibility evaluation parameter (SSEP) rating scheme–an approach for landslide hazard zonation». En: *Journal of African Earth Sciences* 99, 595-612. Online:https://n9.cl/zxw0it.

Rivadeneira, F. y col. (2007). *Breves fundamentos sobre los terremotos en el Ecuador*. Corporación Editora Nacional.

Roccati, A. y col. (2021). «GIS-based landslide susceptibility mapping for land use planning and risk assessment». En: *Land* 10.2, 162. Online:https://n9.cl/oke3i.

Roy, J. y S. Saha (2019). «Landslide susceptibility mapping using knowledge driven statistical models in Darjeeling District, West Bengal, India». En: *Geoenvironmental Disasters* 6.1, 1-18. Online:https://n9.cl/ro35j.

Saaty, Thomas L. (1977). «A scaling method for priorities in hierarchical structures». En: *Journal of mathematical psychology* 15.3, 234-281. Online:https://n9.cl/zvwbr.

— (1990). *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation*. Analytic hierarchy process series. RWS Publications.

Salcedo, D. y col. (2022). «Smart City Planning Based on Landslide Susceptibility Mapping Using Fuzzy Logic and Multi-criteria Evaluation Techniques in the City of Quito, Ecuador». En: *Docto-*

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

ral Symposium on Information and Communication Technologies - DSICT, págs. 89-103.

Salehpour Jam, A. y col. (2021). «GIS-based landslide susceptibility mapping using hybrid MCDM models». En: *Natural Hazards* 108, 1025-1046. Online:https://n9.cl/in8wa.

Secretaría Técnica de la Circunscripción Territorial Especial Amazónica (2021). *Plan Integral para la Amazonía 2021-203*. Secretaría Técnica de la Circunscripción Territorial Especial Amazónica.

Servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias (2022a). *Informe Nro. 136 - Época lluviosa del 01 de enero al 22 de julio de 2022*. Inf. téc. Servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias.

— (2022b). *Informe de Situación No. 45 – Época lluviosa a nivel Nacional - cierre*. Inf. téc. Servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias.

Soeters, R. y C. Van Westen (1996). «Slope instability recognition, analysis and zonation». En: *Landslides: investigation and mitigation* 247, 129-177. Online:https://n9.cl/vma1z.

Sonker, I., J. Tripathi y A. Singh (2021). «Landslide susceptibility zonation using geospatial technique and analytical hierarchy process in Sikkim Himalaya». En: *Quaternary Science Advances* 4, 100039. Online:https://n9.cl/czyzla.

Tešić, D. y col. (2020). «Landslide susceptibility mapping using AHP and GIS weighted overlay method: a case study from Ljig, Serbia». En: *Serbian Journal of Geosciences* 6.1, 9-21. Online:https://n9.cl/h2k7n.

Van Westen, C. (1997). «ILWIS Applications Guide». En: The International Institute for Aerospace Survey y Earth Sciences. Cap. Statistical landslide hazard analysis, págs. 73-84.

Varnes, D. e International Association of Engineering Geology (2021). *Landslide hazard zonation: a review of principles and practice*. Unesco.

Vásquez J. y Estrada, M. (2023). «A comparative study of the bivariate statistical methods and the Analytical Hierarchical Process for the assessment of mass movement susceptibility. A case study: The LM-116 Road-Peru». En: *Rudarsko-geološko-naftni zbornik* 38.1, 149-166. Online:https://n9.cl/u17f0.

Wang, Z. y col. (2022). «Refined zoning of landslide susceptibility: a case study in Enshi County, Hubei, China». En: *International journal of environmental research and public health* 19.15, 9412. Online:https://n9.cl/kwqq4.

Wieczorek, G. (1984). «Preparing a detailed landslide-inventory map for hazard evaluation and reduction». En: *Bulletin of the Association of Engineering Geologists* 21.3, 337-342. Online:https://n9.cl/d0l2y.

Williams, C. y col. (1999). «A comparison of statistical methods for prenatal screening for Down syndrome». En: *Applied Stochastic Models in Business and Industry* 15.2, 89-101. Online:https://n9.cl/38to7.

Wubalem, A. y M. Meten (2020). «Landslide susceptibility mapping using information value and logistic regression models in Goncha Siso Eneses area, northwestern Ethiopia». En: *SN Applied Sciences* 2, 1-19. Online:https://n9.cl/pg3ik.

Zhou, S., S. Zhou y X. Tan (2020). «Nationwide susceptibility mapping of landslides in Kenya using the fuzzy analytic hierarchy process model». En: *Land* 9.12, 535. Online:https://n9.cl/a1cjp.

Zumpano, V. y col. (2014). «A landslide susceptibility analysis for Buzau County, Romania». En: *Rev. Roum. Géogr./Rom. Journ. Geogr* 58.1, 9-16. Online:https://n9.cl/ten7t.

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

La Granja:
Revista de
Ciencias de la Vida

pISSN:1390-3799; eISSN:1390-8596

http://doi.org/10.17163/lgr.n39.2024.08

Artículo científico / Scientific paper

Ciencias Veterinarias

Determinación molecular del agente etiológico de la mastitis bovina de muestras provenientes de unidades productoras andinas

Molecular determination of the etiological agent of bovine mastitis from Andean production units

Nancy Bonifaz*[1], Ximena Galarza[2], Byron Fuertes[3] y Janss Beltrán[1]

[1]*Grupo de investigación NUNKUI WAKAN, Universidad Politécnica Salesiana, Campus el Girón: Isabel la Católica N.23-52 y Madrid, Quito, Ecuador.*
[2]*Instituto Nacional de Investigación en Salud Pública-INSP, Iquique y Yahuachi, Quito, Ecuador.*
[3]*Carrera de Biotecnología, Universidad Politécnica Salesiana, Campus el Girón: Isabel la Católica N.23-52 y Madrid, Quito, Ecuador.*

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

Manuscrito recibido el 17 de junio de 2021. Aceptado, tras revisión, el 15 de julio de 2022. Publicado el 1 de marzo de 2024.

Resumen

La mastitis bovina es una enfermedad que afecta a las ganaderías de pequeños y medianos productores de los cantones Cayambe y Pedro Moncayo, Provincia de Pichincha-Ecuador. El tratamiento de esta enfermedad resulta complicado debido a la variedad de microorganismos que la provocan. El presente estudio se enfocó en la determinación molecular por medio de reacción en cadena de la polimerasa (PCR) de los agentes etiológicos de la mastitis. Esta técnica presenta múltiples ventajas al reconocer familia, género y especie de microorganismos, y es un método capaz de detectar genes de resistencia de antibióticos, lo que resulta importante al momento de diagnosticar y tratar enfermedades. El objetivo de esta investigación se centró en la identificación de bacterias causantes de la mastitis bovina, utilizando pruebas bioquímicas y moleculares. Las pruebas bioquímicas como tinción Gram, Catalasa, Coagulasa, y Agar Manitol Sal fueron eficientes para obtener cepas puras y determinar el género de algunas bacterias. Se utilizaron primers específicos (RNA16S) para la identificación molecular de 9 agentes etiológicos causantes de la enfermedad en las unidades productivas. Los microorganismos encontrados fueron; *Staphylococcus pasteuri, Staphylococcus warneri, Staphylococcus sp., Staphylococcus epidermidis, Staphylococcus aureus, Staphylococcus saprophyticus, Sphingomonas sp., Streptococcus dysgalactiae, Streptococcus uberis*, la mayoría presentes en mastitis clínica. Para detectar genes de resistencia se utilizaron primers específicos, de los cuales 7 muestras presentaron el gen para resistencia a blaTEM (β-lactámicos) y 6 muestras presentaron el gen para resistencia a tetA (tetraciclinas). Se identificó multirresistencia en las especies: *Staphylococcus pasteuri, Staphylococcus aureus, Staphylococcus epidermidis, Streptococcus uberis, Sphingomonas sp*.

Palabras clave: Mastitis, PCR, secuenciación, bioquímica.

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Abstract

Bovine mastitis is a disease that affects the farms of small and medium producers in the cantons of Cayambe and Pedro Moncayo, Pichincha Province-Ecuador. Treating this disease is not easy due to the different microorganisms that cause it. This study focused on the molecular determination by means of polymerase chain reaction (PCR) of the etiological agents of mastitis, having multiple advantages when recognizing family, gender and species of microorganisms. It is a method capable of detecting resistance genes of antibiotics, an important analysis when diagnosing and treating diseases. The aim of this research is to identify bacteria causing bovine mastitis by using biochemical and molecular tests. Biochemical tests such as: Gram staining, Catalase, Coagulase, and Mannitol Salt Agar were efficient to obtain pure strains and determine the gender of some bacteria. Specific primers (RNA16S) were used for the molecular identification of 9 etiological agents causing the disease in the productive units. The microorganisms found were *Staphylococcus pasteuri, Staphylococcus warneri, Staphylococcus sp., Staphylococcus epidermidis, Staphylococcus aureus, Staphylococcus saprophyticus, Sphingomonas sp., Streptococcus dysgalactiae, Streptococcus uberis*, mostly present in clinic mastitis. To detect resistance genes, specific primers were used, of which 7 samples presented the gene for resistance to blaTEM (β-lactam) and 6 samples presented the gene for resistance to tetA (tetracyclines). Multi-resistance was identified in the species *Staphylococcus pasteuri, Staphylococcus aureus, Staphylococcus epidermidis, Streptococcus uberis, Sphingomonas sp*.

Keywords: Mastitis, PCR, sequencing, biochemistry.

Forma sugerida de citar: Bonifaz, N., Galarza, X., Fuertes, B. y Beltrán, J. (2024). Determinación molecular del agente etiológico de la mastitis bovina de muestras provenientes de unidades productoras andinas. La Granja: Revista de Ciencias de la Vida. Vol. 39(1):137-149. http://doi.org/10.17163/lgr.n39.2024.08.

IDs Orcid:

Nancy Bonifaz: http://orcid.org/0000-0002-1029-057X
Ximena Galarza: http://orcid.org/0000-0001-9181-3354
Byron Fuertes: http://orcid.org/0000-0003-4045-6195
Janss Beltrán: http://orcid.org/0000-0002-5035-7863

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

1 Introducción

Según INEC y ESPAC (2016), en el Ecuador se producen 6'202.408 litros de leche diarios, en la región Sierra 4'810.551 litros, (el 75% de la producción nacional), y en la provincia de Pichincha 873.272 litros. Torres (2018) estima que el cantón Cayambe produce alrededor de 425.000 litros diarios de leche, de los cuales destinan para el consumo 51.000 litros, producción artesanal 106.250 litros y venta a granel 267.750 litros. De la misma manera, Céspedes y Pachacama (2012), afirman que en el cantón Pedro Moncayo existe una producción diaria de leche de 13 905 litros diarios.

Bonifaz y Conlago (2016) manifiestan que la mastitis causa grandes molestias a los ganaderos, provocando una disminución en la producción y características de calidad de la leche, viéndose afectada en su composición química, física y bacteriológica, presentando un menor porcentaje de sólidos totales, proteínas, grasa y calcio. Se conoce como mastitis a la inflamación e irritación de la glándula mamaria causada por diversos agentes patógenos, presentando aumento de células somáticas y provocando malestar en el animal; como efecto secundario de esta infección, la textura de la leche cambia sus características organolépticas (Bhattarai y col., 2018). Según Martínez (2012), los síntomas clínicos son aumento en el número de leucocitos, composición y apariencia alterada (grumos), fiebre, cuartos mamarios enrojecidos, hinchados y calientes.

La aparición de la mastitis depende de las condiciones higiénicas de las salas de ordeño (Zhang y col., 2018), edad, raza, partos, periodo de lactancia, producción de leche y condiciones del equipo de ordeño. En caso de que no se utilice equipo de ordeño, se deberá controlar la salud e higiene de la persona encargada del ordeño de las vacas (Ruiz Gil, Peña Rodríguez y Remón Díaz, 2016).

La enfermedad aparece también cuando los factores del medio y el manejo de los animales interactúan de tal manera que la ubre es expuesta a microorganismos patógenos. Hay tres factores esenciales que promueven la mastitis, el hospedador, el agente infeccioso y el medio ambiente (Owens y Nickerson, 2011).

Se han realizado estudios donde se identifican los agentes etiológicos causantes de mastitis (Cervantes y col., 2017); empleando medios de cultivo selectivos se han aislado *Streptococcus agalactiae, Streptococcus uberis, Staphylococcus aureus, E. coli, Klebsiella, Pseudomona, Candida albicans* y *Proteus mirabilis*.

Hernández y col. (2015) en un estudio sobre identificación de agentes etiológicos determinaron que *Staphylococcus aureus* es el microorganismo más importante, con un 26% de prevalencia sobre el total de microorganismos identificados en el departamento de Boyacá.

El método estándar para la identificación de los agentes patógenos consiste en aislamientos en medios de cultivos selectivos, sin embargo, usando este método solamente se hará un diagnóstico hasta el nivel de género de la bacteria (Peña y col., 2012).

La prevalencia de esta enfermedad en el cantón Cayambe y Pedro Moncayo es preocupante, pues los microorganismos patógenos responsables cambian continuamente su dinámica ecológica por las mutaciones que sufren los agentes etiológicos. Por esta causa se han tomado medidas para identificar los agentes patógenos causantes de la mastitis por medio de pruebas bioquímicas y técnicas moleculares que permiten establecer los agentes patógenos y la resistencia a múltiples antibióticos por el mal uso de estos al tratar esta enfermedad (Bonifaz y Conlago, 2016).

Con base a lo mencionado, los objetivos de esta investigación son determinar mediante técnicas moleculares los agentes etiológicos de la mastitis bovina de muestras provenientes de unidades productoras de los cantones Cayambe y Pedro Moncayo, así como también identificar las bacterias de la enfermedad mediante 3 pruebas bioquímicas, detectar los genes de resistencia blaTEM para betalactámicos y tetA para tetraciclinas, en bacterias aisladas en esta investigación mediante la técnica PCR y por último realizar la identificación molecular de los microrganismos aislados a través del secuenciamiento de la región ribosomal RNA 16S.

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

2 Materiales y Métodos

2.1 Toma de muestras de leche

Las muestras de leche fueron tomadas en fincas ganaderas ubicadas en los cantones de Cayambe (coordenadas 0°02'38"N 78°09'22"O) y Pedro Moncayo (coordenadas 0°02'37"N 78°20'57"O), las cuales habían sido previamente identificadas como positivas para mastitis mediante California Mastitis Test (CMT).

Se colectaron un total de 24 muestras de leche siguiendo el protocolo LCL 001 del Laboratorio de calidad de leche de la Universidad Politécnica Salesiana, el cual indica que se deben tomar 40 mL de leche por envase, para su análisis en el equipo FOSSOMATIC células somáticas (CCS) por citometría de flujo. Se seleccionaron para este estudio aquellas muestras que superaron los 500.000 CCS/dL según lo determinado por Nieto y col. (2012).

2.2 Aislamiento microbiano

Las muestras de leche fueron sembradas por hisopado en medio Tripteína Soya Agar (TSA), recomendado para la detección y recuento de una amplia gama de bacterias, y se incubaron a 37 °C por 48 horas (Britania Tripteína Soya Agar, 2015). Posterior a ello, para obtener colonias puras se realizaron varios subcultivos empleando la técnica de siembra por agotamiento en medio TSA (Milián y col., 2014). Se confirmó la presencia de colonias bacterianas puras mediante tinción de Gram.

2.3 Identificación mediante pruebas bioquímicas

Se realizaron cuatro pruebas bioquímicas de identificación bacteriana: Tinción de Gram para diferenciar bacilos y cocos Gram (+) y Gram (-); Catalasa empleando peróxido de hidrógeno al 30 %, esperando visualizar presencia o ausencia de burbujeo (Wanger y col., 2017); Prueba Coagulasa en plasma humano, donde se inocularon las cepas puras e incubadas a 37 °C por 24 horas para analizar presencia o ausencia de coagulación (American Society for Microbiology, 2016); y Agar Manitol Sal (AMS) en donde se realizaron siembras de las cepas aisladas y fueron incubadas a 37 °C por 48 horas con la finalidad de diferenciar bacterias del género *Staphylococcus* (Vila, Zhurbenko y Viera, 2004). La aplicación de estas pruebas tuvo como finalidad evitar que los análisis moleculares se realicen en especies bacterianas repetidas.

2.4 Extracción de ADN y amplificación de la región 16S rRNA

Las cepas puras fueron masificadas en medio Tryptic Soya Broth (TSB) hasta llegar a una concentración de 12×10^8 (UFC/mL) la cual fue determinada por comparación con patrones de turbidez de la escala McFarland. En tubos de 1,5 mL se colocó 1mL de cultivo bacteriano de cada cepa masificada y la muestra se centrifugó para formar un pellet de bacterias que fue empleado para la extracción de ADN en base a lo recomendado por Becton et al. (2005). La extracción de ADN total se realizó empleando el protocolo de extracción de ADN de Köchl, Niederstätter y Parson (2005). La presencia o ausencia de ADN fue confirmada mediante electroforesis en gel de agarosa al 1 % (Buitrago, 2010). El ADN obtenido fue conservado en una solución de Tris-EDTA a -20 °C (Tan y Yiap, 2009).

La amplificación de la región 16S rRNA se realizó usando los primers 27F ($5'$TCCTACGGGAGGCAGCAGT$3'$) y 1492R ($5'$GGACTACCAGGGTATCTAATCCTGTT$3'$) diseñados por Marchesi y col. (1998). Se usó la técnica PCR, utilizando el termociclador marca Labnet Multigene bajo las siguientes condiciones: desnaturalización inicial a 95 °C por 5 minutos, 25 ciclos de desnaturalización a 95 °C por 1 minuto, annealing a 60 °C por 2 minuto, extensión inicial por 1 minuto a 72 °C y extensión final de 7 minutos a 72 °C seguido de mantenimiento a 4 °C (Kang y col., 2015). Se determinó la presencia de amplicones realizando electroforesis en gel de agarosa al 1 %.

2.5 Secuenciación y análisis de secuencias

Los amplicones fueron secuenciados bajo la técnica de Sanger en MACROGEN, Corea del Sur. Las secuencias obtenidas se compararon con secuencias existentes en el GeneBank del Centro Nacional para la Información Biotecnológica (NCBI).

Posteriormente, las secuencias fueron alineadas con la herramienta Muscle de software Mega 6 para obtener un árbol filogenético empleando la he-

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

rramienta *neighbor joining* de Mega 6 para realizar una correcta clasificación taxonómica de los agentes etiológicos aislados (Fuertes y Cerna, 2018).

2.6 Amplificación de genes de resistencia a antibióticos blaTEM (β-lactámicos) y tatA (tetraciclinas)

La presencia o ausencia de genes de resistencia a antibióticos se determinó empleando los siguientes primers específicos descritos por Tao y col. (2014), para blaTEM: Forward (5′GCA CGA GTG GGT TAC ATC GA 3′) y Reverse (5′GGT CCT CCG ATC GTT GTC AG 3′) el tamaño aproximado del gen de resistencia es de 300 pb; para tetA: Forward (5′GCT ACA TCC TGC TTG CCT TC 3′) y Reverse (5′CAT AGA TCG CCG TGA AGA GG 3′). Según Belding y Boopathy (2018) el tamaño aproximado del gen de resistencia es de entre 250 a 300 pb. Los resultados obtenidos fueron verificados en electroforesis en gel de agarosa al 1%.

3 Resultados y Discusión

3.1 Identificación mediante pruebas bioquímicas

Se aislaron un total de 17 cepas bacterianas. La tinción Gram dio como resultado 15 especies Gram positivas y 2 especies Gram negativas, como se indica en la Tabla 1.

Tras la aplicación de las pruebas de catalasa se identificaron 11 especies catalasa positivo y 6 especies catalasa negativo. Las pruebas de coagulasa permitieron identificar 1 especie coagulasa positivo y 16 especies coagulasa negativo. Chaneton (2010), afirma que los *Staphylococcus* coagulasa negativos son los patógenos con mayor predominio, al ser identificados en función al tipo de infección 47% en infección latente y 28% en mastitis subclínica.

Las siembras en Agar Manitol Sal (AMS) permitieron catalogar a 4 especies como positivas a fermentación de manitol, 8 especies negativas a fermentación de manitol y 5 especies bacterianas que no dieron un resultado determinado.

Tabla 1. Resultados obtenidos de aplicación de pruebas Bioquímicas

Código de la muestra	Aplicación de Pruebas Bioquímicas			
	Tinción Gram	Catalasa	Coagulasa	Agar Manitol Sal
835	+	+	-	+
A2r	+	+	-	+
D2r	+	+	-	****
I2r	+	+	-	+
A3r	+	+	-	+
809	+	+	-	-
798	+	+	+	****
799c1	+	+	-	-
H3R	+	+	-	-
11	+	-	-	****
11ª	+	-	-	****
1C	-	+	-	-
2C	-	+	-	****
1B	+	-	-	-
E1	+	-	-	-
99	+	-	-	-
799	+	-	-	-

Resultado de la clasificación por pruebas bioquímicas de las cepas bacterianas aisladas; (+) = Resultado positivo, (-) = Resultado negativo, (****) = Resultado inconcluso.

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

3.2 Identificación mediante métodos moleculares

El ADN total obtenido fue de aproximadamente 7000 pb, basándose en la escalera molecular del kit Thermo Scientific 2× Phire Plant Direct (Figura 1).

La amplificación de la región 16S rRNA dio como resultado bandas de aproximadamente 1300 pb (Figuras 2 y 3). La validez de las secuencias obtenidas fue analizada empleando el software FinchTV, con lo cual se descartaron 3 secuencias por no contar con la calidad adecuada. Con las secuencias restantes se obtuvo la identidad de 15 especies correspondientes al dominio Bacteria.

Las secuencias obtenidas en esta investigación fueron comparadas con secuencias presentes en la base de datos en el GeneBank del NCBI. Los porcentajes de identidad superaron el 97% en todos los casos, a excepción de las cepas codificadas como 1C, 2C y E1. Sol-Church y Frenck (2014), sugieren aceptar porcentajes de identidad superiores al 95%. Las secuencias de las especies catalogadas como D2r, 798 y 2C no contaron con un registro taxonómico en la base de datos del NCBI, siendo catalogadas como bacterias no cultivadas. Para realizar una correcta identificación de los agentes etiológicos aislados se elaboró un árbol filogenético empleando las 15 secuencias obtenidas y 4 secuencias externas usadas de referencia descargadas de la base de datos del NCBI (Figura 4).

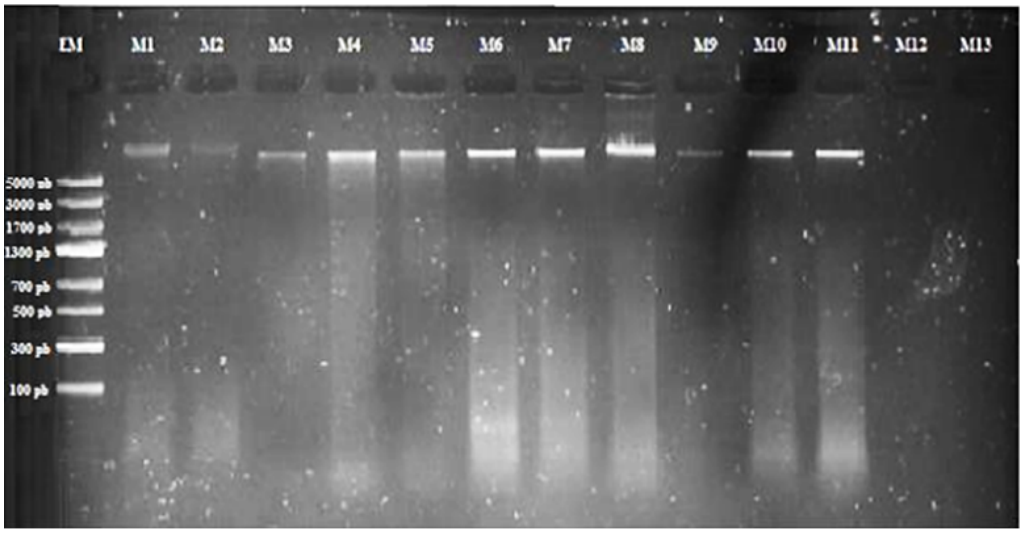

Figura 1. ADN total en gel de electroforesis.

Las especies aisladas fueron identificadas como agentes etiológicos causantes de mastitis en el ganado bovino lechero en la zona de estudio. Basados en la información obtenida con el árbol filogenético, se establecieron tres clados:

- Clado (I): Los aislamientos identificados como *Staphylococcus* sp. (A3r), *S. pasteuri* (835, A2r), *S. Warneri* (I2r), *S. epidermidis* (809) y *S. saprophyticus* (799c1), se encuentran en este clado. Existieron especies que no pudieron ser identificadas a nivel taxonómico como es el caso de Bacterium strain 2BL_4 (D2r) la cual se alineó con *S. warneri* y una bacteria no cultivada clone ncd2254e01c2 (798), especies que se agruparon a la secuencia de referencia de *Staphylococcus aureus* usada como especie externa, determinando que estas pueden pertenecer al mismo género, pero de diferente cepa.

- Clado (II): Incluyen a *Sphingomonas* sp. (C1) y Bacterium strain 4BL_5 (2C) agrupadas estrechamente con la cepa de referencia tipo de ATCC *Sphingomonas paucimobilis*. Esta relación la confirma Clavijo y col. (2012), ya que existen géneros que se encuentran dentro de

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

un mismo grupo, comparten características y coinciden también con la identificación molecular.

- Clado (III): Todos los aislamientos en el clado III coinciden al ser del mismo género *Streptococcus* al agruparse en las siguientes especies *S. uberis* (99, 799), *S. dysgalactiae* (B1) el cual se agrupó con *Streptococcus* sp. (E1).

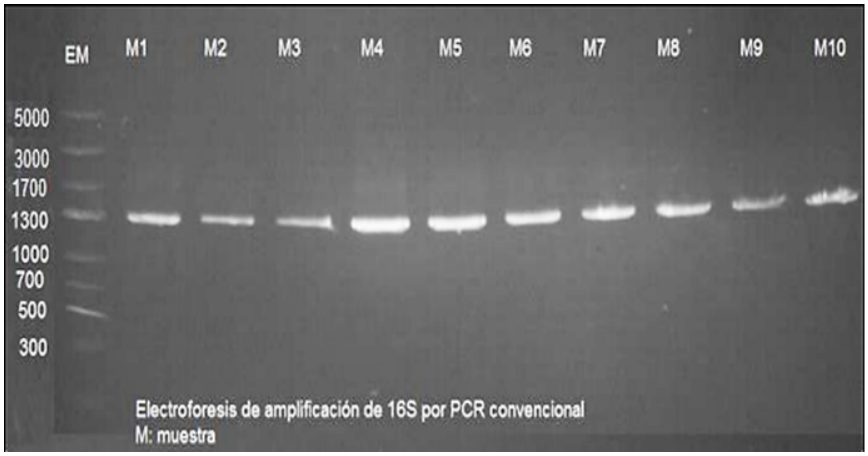

Figura 2. Electroforesis de amplificación de 16S por PCR convencional.

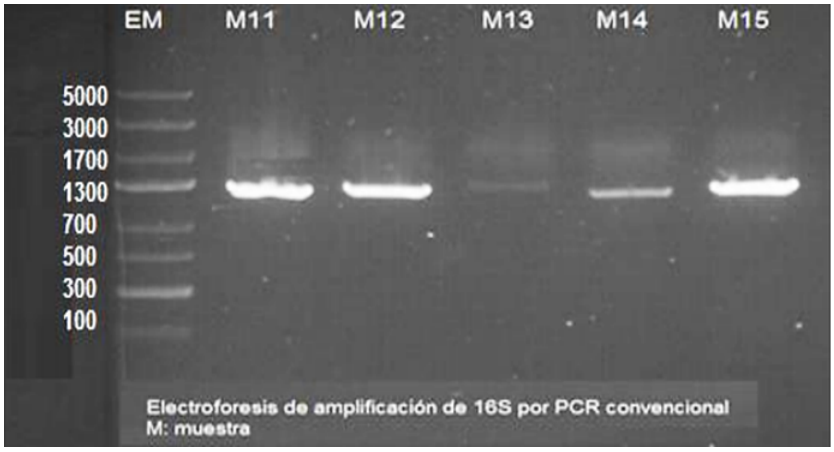

Figura 3. Electroforesis de amplificación de 16S por PCR convencional.

En la Tabla 2 se evidencian los géneros de los agentes patógenos identificados en esta investigación, que son *Staphylococcus*, *Sphingomonas* y *Streptococcus*. Existen bacterias que son componentes normales de la microbiota cutánea, entre ellas bacterias del género *Sphingomonas* y *Streptococcus* (Chen, Fischbach y Belkaid, 2018).

Según Fariña y col. (2013), *Sthaphylococcus* es uno de los géneros aislados con mayor frecuencia en estudios de prevalencia de mastitis. Lange y col. (2015) mencionan que las especies pertenecientes al género Streptococcus están vinculadas con la mastitis bovina al ser bacterias oportunistas. Ruiz y col. (2011) en un estudio sobre mastitis subclínica asociada al ordeño manual y mecánico determinan a *Staphylococcus* sp. como el agente patógeno principal con un 61 % de predominancia seguido de *Strep-*

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

tococcus sp. con 29,6% de incidencia. Braga y col. (2018) al realizar una identificación de patógenos de la mastitis bovina por espectrofotometría de masas MALDI-TOF determinaron que aproximadamente el 80% de los casos de mastitis era ocasionado por el grupo de bacterias *Staphylococcus aureus, Streptococcus uberis y Streptococcus dysgalactiae*.

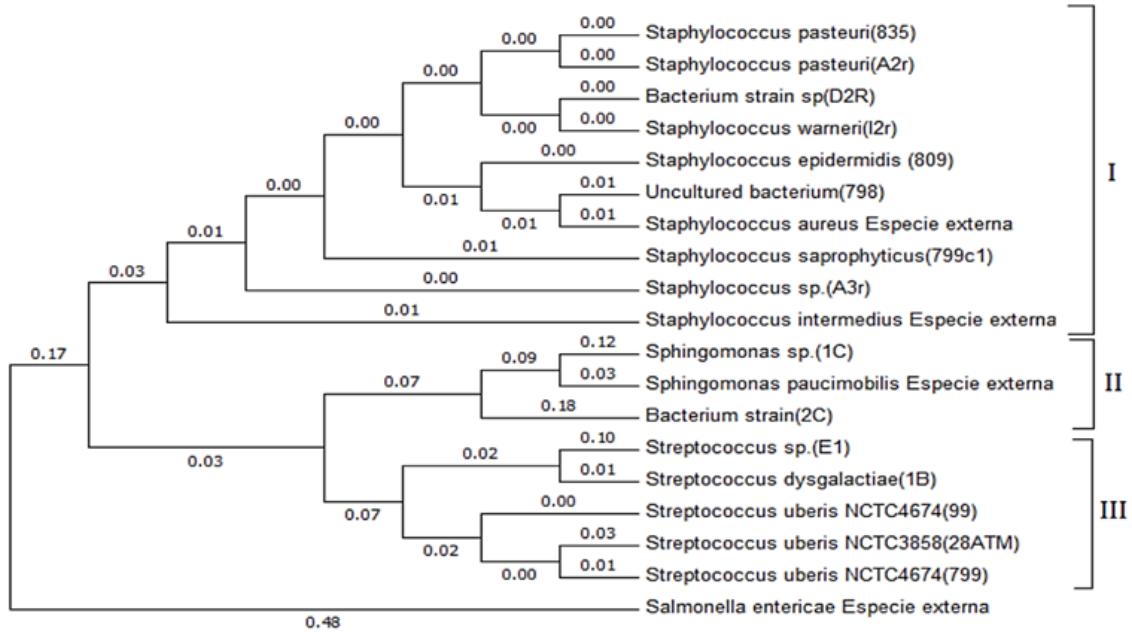

Figura 4. Árbol filogenético elaborado a partir de la secuenciación de la región 16S rRNA de las especies aisladas.
Fuente: elaboración propia, 2018

Davies y col. (2016) mencionan que el 63% de los eventos potenciales de transmisión y el 38% de incidencia de mastitis clínica es causada por *S. uberis* en hatos lecheros. Nam y col. (2009) mencionan que cerca del 40% de los casos de mastitis clínica son originados por bacterias Gram (-) vinculadas a la mastitis, y el patógeno no coliforme más comúnmente asociado con las infecciones intramamarias es *Sphingomonas* sp.

3.3 Determinación de resistencia a antibióticos

La amplificación del gen de resistencia blaTEM para la familia de los β-lactámicos dio como resultado bandas de aproximadamente 300 pb, datos corroborados por Tao y col. (2014). Se encontró el gen de resistencia en las especies *Staphylococcus pasteuri, Staphylococcus warneri, Staphylococcus epidermidis, Staphylococcus saprophyticus, Streptococcus uberis, Sphingomonas* sp. y *Staphylococcus aureus* (Figura 5).

Por otra parte, la amplificación del gen de resistencia tetA para la familia de las tetraciclinas dio como resultado bandas de aproximadamente 250 pb. De acuerdo con Belding y Boopathy (2018), el gen de resistencia para la familia de antibióticos tetraciclinas posee un tamaño de entre 210 a 300 pb. Se encontró el gen de resistencia en las especies *Staphylococcus pasteuri, Staphylococcus epidermidis, Streptococcus uberis, Streptococcus dysgalactiae, Staphylococcus aureus* y *Sphingomonas* sp. (Figura 6).

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

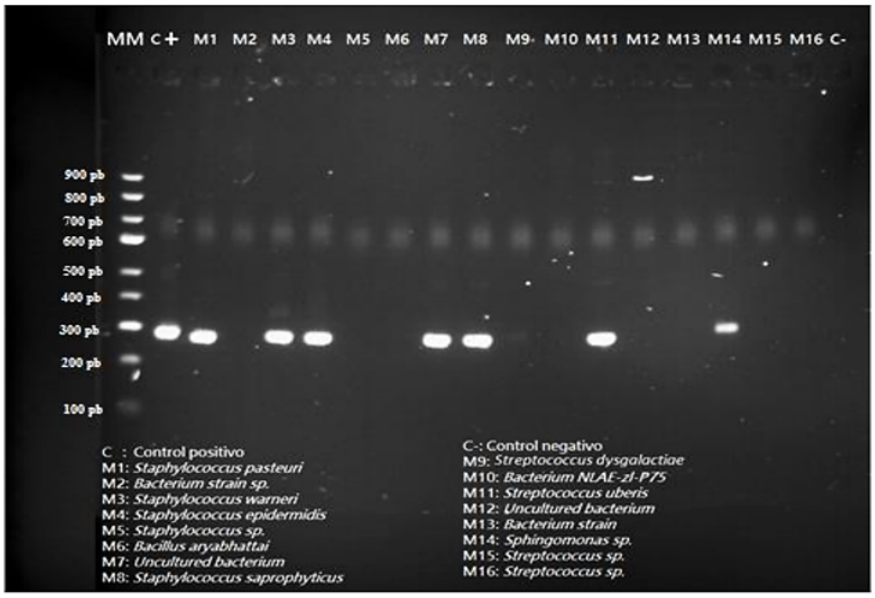

Figura 5. Gel de electroforesis que demuestra la presencia/ausencia del gen de resistencia blaTEM para antibióticos de la familia β-lactámicos.

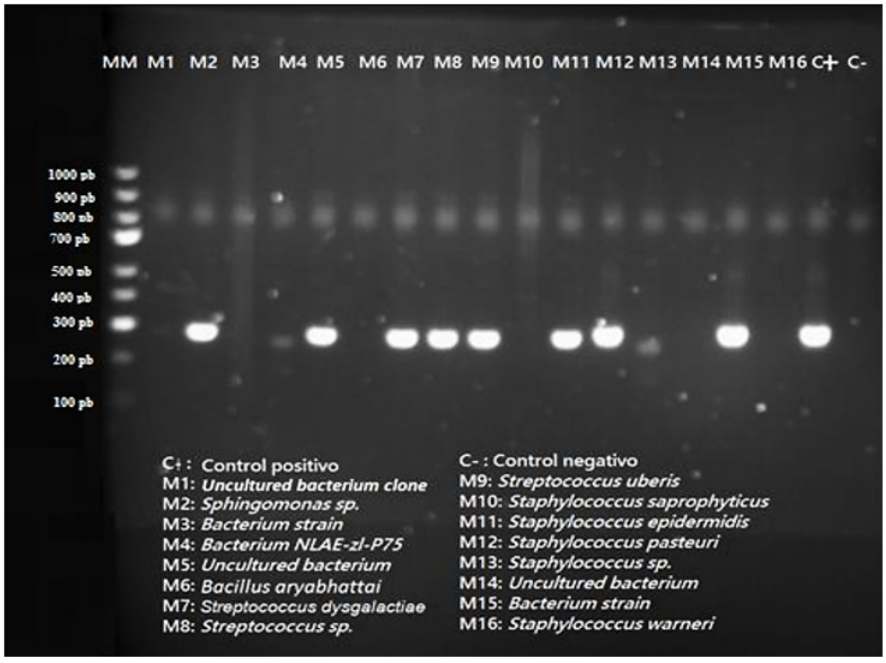

Figura 6. Gel de electroforesis que demuestra presencia/ausencia de gen de resistencia tetA para antibióticos de la familia de tetracilcinas.

Corroborando los resultados obtenidos en este estudio (Tabla 3), otros estudios de resistencia a antibióticos en patógenos relacionados a mastitis han determinado que las especies resistentes a β-lactámicos son *Staphylococcus warneri, Streptococcus uberis* (Bonetto, 2014), *Staphylococcus epidermidis* (Fariña y col., 2013), *Staphylococcus saprophyticus, Sphingomonas* sp., *S. aureus* (Ramírez, Fernández y Pala-

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

cio, 2018) y *Staphylococcus pasteuri* (Arrepia, 2008). De igual manera, de acuerdo con estudios realizados por otros autores las especies *S. epidermidis* presentan resistencia a tetraciclinas (Ramírez, Fernández y Palacio, 2018), *S. uberis, S. dysgalactiae*, (Florentin, 2007) y *S. pasteuri* (Savini y col., 2009), mostrando esta última resistencia a numerosas clases de compuestos antibióticos como meticilina/ oxacilina, macrólidos, lincosamidas, estreptograminas y tetraciclinas.

Tabla 2. Clasificación taxonómica de los agentes etiológicos causantes de mastitis bovina aislados en los cantones de Cayambe y Pedro Moncayo, provincia de Pichincha.

Código	Especie	Query cover (%)	Identidad	Acceso
835	*Staphylococcus pasteuri*	99	97	gi|388894673|JQ726643.1
A2r	*Staphylococcus pasteuri*	100	99	gi|762210140|LN623633.1
D2r	*Staphylococcus* sp.	98	99	gi|1193828147|MF112182.1
I2r	*Staphylococcus warneri*	99	99	gi|1409189597|MF662223.1
A3r	*Staphylococcus* sp. *strain CLC-F26*	100	99	gi|1408623646|MH518208.1
809	*Staphylococcus epidermidis strain TWSL_20*	96	99	gi|846351151|KT184900.1
798	*Staphylococcus* sp.	91	98	gi|322180115|JF194710.1
799c1	*Staphylococcus saprophyticus strain WWi167*	99	99	gi|1393269660|MH396756.1
1C	*Sphingomonas* sp. *strain Ap02E*	78	89	gi|1080032407|KX990222.1
2C	*Sphingomonas* sp.	97	91	gi|1193828182|MF112217.1
1B	*Streptococcus dysgalactiae strain JZ R-75*	34	99	MH119693.1
E1	*Streptococcus* sp. *XJ150-1212-NJR1*	95	90	gi|564983989|KF828882.1
99	*Streptococcus uberis strain NCTC4674*	99	99	gi|1403452574|LS483408.1
799	*Streptococcus uberis strain NCTC3858*	99	97	gi|1403426722|LS483397.1

Fuente: NCBI(2019).

4 Conclusiones

El uso de la técnica molecular permitió identificar género y especie en la mayoría de los microorganismos aislados, con lo cual se concluye que la identificación molecular del agente etiológico es importante en el estudio de la mastitis bovina al ser una prueba más específica que las bioquímicas.

Se pudo determinar que los agentes etiológicos de mayor prevalencia de mastitis bovina en los cantones Cayambe y Pedro Moncayo son los microorganismos pertenecientes a los géneros *Staphylococcus* y *Streptococcus*, siendo los más comunes *Staphylococcus pasteuri, Staphylococcus warneri, Staphylococcus* sp., *Staphylococcus epidermidis, Staphylococcus aureus, Staphylococcus saprophyticus, Sphingomonas* sp., *Streptococcus dysgalactiae, Streptococcus uberis*.

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Tabla 3. Especies resistentes a β-lactámicos y tetracilinas

Especies con gen de resistencia blaTEM	Especies con gen de resistencia tetA
Staphylococcus pasteuri	*Staphylococcus pasteuri*
Staphylococcus aureus	*Staphylococcus aureus*
Staphylococcus epidermidis	*Staphylococcus epidermidis*
Streptococcus uberis	*Streptococcus uberis*
Sphingomonas sp.	*Sphingomonas* sp.
Staphylococcus warneri	*Streptococcus dysgalactiae*
Staphylococcus saprophyticus	

La técnica molecular también permitió identificar en las bacterias causantes de la mastitis bovina la presencia de genes de resistencia a dos familias de antibióticos. Las bacterias resistentes a los β-lactámicos fueron *Staphylococcus pasteuri, Staphylococcus aureus, Staphylococcus epidermidis, Streptococcus uberis* y *Sphingomonas* sp; y las bacterias determinadas como resistentes a las tetraciclinas fueron *Staphylococcus pasteuri, Staphylococcus aureus, Staphylococcus epidermidis, Streptococcus uberis, Sphingomonas* sp., *Streptococcus dysgalactiae*.

La identificación molecular de diferentes géneros y especies bacterianas causantes de la mastitis bovina junto con el estudio de los genes de resistencia a los antibióticos permite tener un diagnóstico más seguro para instaurar un tratamiento eficaz contra esta enfermedad multifactorial que aqueja a las vacas lactantes en la gran mayoría de las unidades productivas lecheras del Ecuador.

Contribución de los autores

NFBG; Conceptualización, Administración del proyecto, metodología Investigación, Responsabilidad, Visualización, Escritura borrador original, revisión y edición. XAGJ; Metodología, Investigación de campo y laboratorio, muestreo de leche, microbiología, tratamiento de datos a nivel molecular. BGFF; Metodología, investigación de laboratorio, microbiología tratamiento de datos a nivel molecular. NJBG; Conceptualización, tratamiento de datos, análisis formal, Curación de datos.

Referencias

American Society for Microbiology (2016). «Coagulase Test Protocol». Online:https://bit.ly/3GVDLqd.

Arrepia, E. (2008). «Prevalência da Resistência a Antibióticos, Metais e Desinfectantes em Isolados de *Staphylococcus* Provenientes de uma Etar Municipal». Tesis de mtría. Universidade do Porto. Online:https://bit.ly/3BfsHRv.

Belding, C. y R. Boopathy (2018). «Presence of Antibiotic-Resistant Bacteria and Antibiotic Resistance Genes in Coastal Recreational Waters of Southeast Louisiana, USA». En: *Journal of Water Supply: Research and Technology-AQUA* 67.8, 800-809. Online:https://bit.ly/41eBvT8.

Bhattarai, D. y col. (2018). «Mechanism of Pattern Recognition Receptors (PRRs) and Host Pathogen Interplay in Bovine Mastitis». En: *Microbial Pathogenesis* 120, 64-70. Online:https://bit.ly/3mN7bAc.

Bonetto, C. (2014). «Mastitis bovina causada por *Staphylococcus* coagulasa negativos. Retrieved from degree Thesis information Doctor en Ciencias Veterinarias, Universidad Nacional de la Plata.» Tesis doct. Universidad Nacional de La Plata. Online:https://bit.ly/3px3qQ8.

Bonifaz, N. y F. Conlago (2016). «Prevalencia e incidencia de mastitis bovina mediante la prueba decalifornia mastitis test con identificación del agente etiológico, en paquiestancia, Ecuador». En: *La Granja* 24.2, 43-52. Online:https://bit.ly/3KLBbnN.

Braga, P. y col. (2018). «Rapid identification of bovine mastitis pathogens by MALDI-TOF Mass Spectrometry». En: *Pesquisa Veterinária Brasileira* 38, 586-594. Online:https://bit.ly/42OddzT.

Britania Tripteína Soya Agar (2015). *Manual uso de Tripteína Soya Agar, Britanialab.com*. Online:https://bit.ly/40D0Q82.

Buitrago, J. González de (2010). «Técnicas y Métodos de Laboratorio Clínico». En: Elsevier España. Cap. 15 - Electroforesis, 211–217. Online:https://bit.ly/3plSRzk.

Cervantes, P. y col. (2017). «Aislamiento de patógenos causantes de mastitis subclínica en vacas del trópico húmedo en Veracruz, México». En: *Actas Iberoamericanas en Conservación Animal AICA* 10, 103-109. Online:https://bit.ly/41gDYwk.

Céspedes, J. e I. Pachacama (2012). «Situación socio económica de la Parroquia la Esperanza del Cantón Pedro Moncayo, Provincia de Pichincha sobre la base de cadena corta». Tesis de mtría. Universidad Central del Ecuador. Online:https://bit.ly/3NXkNUw.

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Chaneton, L. (2010). «Nuevos enfoques en el diagnóstico, prevención y tratamiento de la mastitis bovina a través del uso de moléculas con acción antimicrobiana». Tesis doct. Universidad de Buenos Aires. Online:https://bit.ly/3HUP56I.

Chen, Y., M. Fischbach e Y. Belkaid (2018). «Skin microbiota-host interactions». En: *Nature* 553, 427-436. Online:https://go.nature.com/3KOmm3R.

Clavijo, C. y col. (2012). «Aislamiento, caracterización e identificación de bacterias diazotróficas de la rizósfera del cultivo de *Olea europea* "olivo" en Tacna Perú». En: *Ecología Aplicada* 11.2, 89-102. Online:https://n9.cl/5bpg0.

Davies, P. y col. (2016). «Molecular epidemiology of *Streptococcus uberis* clinical mastitis in dairy herds: strain heterogeneity and transmission». En: *Journal of Clinical Microbiology* 54.1, 68-74. Online:https://bit.ly/41nnClL.

Fariña, N. y col. (2013). «Clinically significant coagulase-negative staphylococci: most frequent species and virulence factors». En: *Revista Chilena de Infectología: Órgano Oficial de La Sociedad Chilena de Infectología* 30.5, 480-488. Online:https://bit.ly/3Ackehp.

Florentin, C. C. (2007). «Perfil de Resistencia *In Vitro* a Antimicrobianos de Cepas Causantes de Mastitis Aisladas de leche Cruda Bovina en Establecimientos de Pequeña y Mediana Producción». En: *Memorias del Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Salud* 5.1, 19-25. Online:https://bit.ly/3ULnIkw.

Fuertes, G. y M. Cerna (2018). «Identificación morfológica y molecular de hongos micorrízicos de especies del género *Dracula y Epidendrum (Orchidaceae)*». En: vol. 1. Bionatura Conference Serie 1, 1-17. Online:https://bit.ly/3pkzYwI.

Hernández, J. y col. (2015). «Agentes etiológicos de mastitis bovina en municipios con importante producción lechera del departamento de Boyacá». En: *Revista Investigación en Salud Universidad de Boyacá* 2.2, 162-176. Online:https://bit.ly/3on9uu5.

INEC y ESPAC (2016). *Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua ESPAC 2016*. Inf. téc. Online:https://bit.ly/3UQDYRm.

Kang, J. y col. (2015). «Rapid origin determination of the Northern Mauxia Shrimp (*Acetes chinensis*) based on allele specific polymerase chain reaction of partial mitochondrial 16S rRNA gene». En: *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences* 28.4, 568-572. Online:https://bit.ly/3MT8IiJ.

Köchl, S., H. Niederstätter y W. Parson (2005). «Forensic DNA typing protocols». En: vol. 297. Humana Press. Cap. DNA extraction and quantitation of forensic samples using the phenol-chloroform method and real-time PCR, 13-29. Online:https://bit.ly/41s672W.

Lange, C. y col. (2015). «Species-level identification of staphylococci isolated from bovine mastitis in Brazil using partial 16S rRNA sequencing». En: *Veterinary Microbiology* 176.3-4, 382-388. Online:https://bit.ly/41r7gbG.

Marchesi, J. y col. (1998). «Design and Evaluation of Useful Bacterium-Specific PCR Primers that Amplify Genes Coding for Bacterial 16S rRNA». En: *Applied and Environmental Microbiology* 64.2, 795-799. Online:https://bit.ly/41K8rmZ.

Martínez, G. (2012). «Prácticas de ordeño y prevalencia de mastitis subclínica en vacas lecheras que abastecen el Centro de Acopio ULDE-SA del municipio El Sauce en el Departamento de León septiembre-noviembre 2011». Tesis de mtría. Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua. Online:https://bit.ly/44SdZxI.

Milián, G. y col. (2014). «Aislamiento e identificación de cepas de *Bacillus spp*. en diferentes ecosistemas con fines probióticos. Su utilización en animales». En: *Revista Cubana de Ciencia Agrícola* 48.4, 347-351. Online:https://bit.ly/3AkYb8l.

Nam, H. y col. (2009). «Prevalence and antimicrobial susceptibility of gram-negative bacteria isolated from bovine mastitis between 2003 and 2008 in Korea». En: *Journal of Dairy Science* 92.5, 2020-2026. Online:https://bit.ly/3UXqRhi.

Nieto, D. y col. (2012). *Manual de buenas prácticas de ganadería bovina para la agricultura familiar: Tratamientos bovinos. Ministerio de Ganadería, Chile*. Inf. téc. Online:https://www.fao.org/3/i3055s/i3055s.pdf.

Owens, W. y S. Nickerson (2011). «Mastitis Therapy and Control | Medical Therapy Options». En: Elsevier. Cap. Encyclopedia of Dairy Sciences(Second Edition), 435–439. Online:https://bit.ly/3nPL5xq.

Peña, W. y col. (2012). «Identificación de bacterias causantes de mastitis subclínica en bovinos de una finca del estado Trujillo-Venezuela». En: *Revista Academia* 11.24, 355-363. Online:https://bit.ly/3MZIBXr.

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Ramírez, N., J. Fernández y L. Palacio (2018). «Taxa de incidência de mastite clínica e susceptibilidade antibiótica de patógenos produtores de mastite em gado leiteiro do norte de Antioquia, Colômbia». En: *Revista de Medicina Veterinaria* 36, 75-87. Online:https://n9.cl/aq2ze.

Ruiz Gil, A., J. Peña Rodríguez y D. Remón Díaz (2016). «Mastitis bovina en Cuba. Artículo de revisión». En: *Revista de Producción Animal* 28.2-3, 39-50. Online:https://bit.ly/420v6v1.

Ruiz, A. y col. (2011). «Prevalencia de mastitis bovina subclínica y microorganismos asociados: comparación entre ordeño manual y mecánico, en Pernambuco, Brasil». En: *Revista de Salud Animal* 33.1, 57-64. Online:https://n9.cl/n45jo.

Savini, V. y col. (2009). «Epidemiology, pathogenicity and emerging resistances in Staphylococcus pasteuri: from mammals and lampreys, to man». En: *Recent Patents on Anti-Infective Drug Discovery* 4.2, 123-129. Online:https://bit.ly/3V4ley0.

Sol-Church, K. y J. Frenck (2014). *Sequencing Guidelines. Biomolecular Core Facility*. Inf. téc. Online:https://bit.ly/3AoZW4n.

Tan, S. y B. Yiap (2009). «DNA, RNA, and protein extraction: the past and the present». En: *Journal of Biomedicine and Biotechnology* 2009.574398. Online:https://bit.ly/3AkdwpL.

Tao, C.-W. y col. (2014). «Evaluation of five antibiotic resistance genes in wastewater treatment systems of swine farms by real-time PCR». En: *Science of the Total Environment* 496, 116-121. Online:https://bit.ly/40vEDIY.

Torres, X. (2018). «Estudio de la producción de la industria láctea del cantón Cayambe en el período 2009-2015». Tesis de mtría. Universidad Andina Simón Bolívar, Sede Ecuador. Online:https://bit.ly/3NZDA1I.

Vila, A., R. Zhurbenko y D. Viera (2004). «Propuesta de una modificación en la formulación del medio agar manitol salado utilizado en el aislamiento de estafilococos de importancia clínica». En: *Revista Cubana de Medicina Tropical* 56.3, 172-177. Online:https://n9.cl/60tsu.

Wanger, A. y col. (2017). «Microbiology and Molecular Diagnosis in Pathology». En: Elsevier. Cap. Chapter 5 - Biochemical Tests and Staining Techniques for Microbial Identification, 61–73. Online:https://bit.ly/3nQxKVy.

Zhang, S. y col. (2018). «Phenotypic and genotypic characterization of antimicrobial resistance profiles in *Streptococcus dysgalactiae* isolated from bovine clinical mastitis in 5 provinces of China». En: *Journal of Dairy Science* 101.4, 3344-3355. Online:https://bit.ly/43Wgw9g.

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

La granja:
Revista de
Ciencias de la Vida

pISSN:1390-3799; eISSN:1390-8596

http://doi.org/10.17163/lgr.n39.2024.09

Artículo científico / Scientific paper

Biotecnología

Respuesta del maíz harinoso (*Zea mays L. var. Amylacea*) a la inoculación de *Azospirillum* y *Pseudomonas*

Response of flour corn (*Zea mays L. var. Amylacea*) to the inoculation of *Azospirillum* and *Pseudomonas*

Carlos Sangoquiza-Caiza[1], Jose Zambrano-Mendoza*[2], Misterbino Borgues-García[3] y Kang J. Cho[1]

[1]*Korea Program on International Agriculture (KOPIA), Ecuador. Mejía, Ecuador.*
[2]*Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP). Estación Experimental Santa Catalina, Mejía, Ecuador.*
[3]*Centro de Estudios de Biotecnología Vegetal. Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad de Granma, Bayamo, Cuba.*

*Autor para correspondencia: jose.zambrano@iniap.gob.ec

Manuscrito recibido el 06 de junio de 2020. Aceptado, tras revisión, el 07 de septiembre de 2021. Publicado el 1 de marzo de 2024.

Resumen

Las bacterias benéficas que habitan la rizósfera de las plantas son de gran interés agrícola debido a su capacidad para producir fitohormonas durante la colonización radicular. Estas fitohormonas producen cambios fisiológicos en la planta que favorecen una mayor absorción de nutrientes que provocan un rápido crecimiento vegetativo y una mayor producción. Esta investigación tuvo como objetivo evaluar el efecto de la inoculación de dos de estas bacterias, *Azospirillum* sp. y *Pseudomonas fluorescens* en el cultivo de maíz harinoso bajo condiciones de campo típicas de la región alto andina. El experimento se realizó utilizando semilla de maíz harinoso de la variedad INIAP-101 con un diseño de bloques completos al azar y seis repeticiones. Los tratamientos correspondieron a: T1 (*Azospirillum* sp.), T2 (*P. fluorescens*), T3 (*Azospirillum* sp. y *P. fluorescens*), T4 (testigo con fertilización química convencional) y T5 (testigo absoluto). La aplicación de estas bacterias incrementó de manera significativa ($p<0,05$) la longitud de raíz, el diámetro de la mazorca y el rendimiento del maíz tierno (elotes o choclos). La inoculación combinada de estas bacterias (T3) obtuvo el mayor rendimiento con 19,70 t ha^{-1} de choclos, mientras que el testigo químico y el testigo absoluto obtuvieron 17,12 y 13,58 t ha^{-1} de choclos, respectivamente. El análisis económico de T3 reportó un coste/beneficio de 1,35, lo cual indicó que el sinergismo de estos dos géneros podría ser una estrategia sostenible para mejorar los rendimientos y reducir el uso de fertilizantes químicos en el cultivo de maíz de la región Andina.

Palabras clave: biofertilizantes, bioinoculantes, choclo, producción sustentable.

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Abstract

Plant growth-promoting bacteria (PGPB) that inhabit root rhizosphere of plants are of great agricultural importance due to their ability to produce phytohormones during root colonization. These phytohormones produce physiological changes in the plant that favor a greater absorption of nutrients, promote growth and increase production. This study analyzed the effect of inoculation of two of these bacteria, *Azospirillum* sp. and *Pseudomonas fluorescens*, under field conditions representative of the Andean Highlands. The experiment was carried out using flour corn seed of the INIAP-101 variety in a randomized complete block design with six repetitions. The treatments corresponded to: T1 (*Azospirillum* sp.), T2 (*P. fluorescens*), T3 (*Azospirillum* sp. and *P. fluorescens*), T4 (control, conventional chemical fertilization) and T5 (absolute control). The application of these bacteria significantly increased ($p<0.05$) the root length, the diameter of the cob, and the yield of fresh corn ("elotes" or "choclos"). The combined inoculation of these bacteria (T3) obtained the highest yield, with 19.70 t ha^{-1} of fresh corn; while the chemical control and the absolute control got 17.12 and 13.58 t ha^{-1} of fresh corn, respectively. The economic analysis of T3 reported a benefit/cost of 1.35, which indicates that the synergism of these two bacteria could be a sustainable strategy to improve yields and reduce the use of chemical fertilizers for corn production in the Andean region.

Keywords: biofertilizers, bioinoculants, fresh corn, sustainable production.

Forma sugerida de citar: Sangoquiza-Caiza, C., Zambrano-Mendoza, J., Borgues-García, M. y Choi, K. (2024). Respuesta del maíz harinoso (Zea mays L. var. Amylacea) a la inoculación de Azospirillum y Pseudomonas. La Granja: Revista de Ciencias de la Vida. Vol. 39(1):150-159. http://doi.org/10.17163/lgr.n39.2024.09.

IDs Orcid:

Carlos Sangoquiza-Caiza: http://orcid.org/0000-0003-1566-9463
Jose Zambrano-Mendoza: http://orcid.org/0000-0001-7206-1863
Misterbino Borgues-García: http://orcid.org/0000-0002-2052-7294
Kang J. Cho: http://orcid.org/0000-0001-7438-376X

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

1 Introducción

El maíz harinoso (*Zea mays* L. var. *Amylacea*) es uno de los cultivos más importantes de la sierra ecuatoriana, debido a la gran cantidad de superficie que se destina a su producción y a su papel en la dieta básica de la población (Yánez y col., 2013). Anualmente se cultivan alrededor de 62 581 ha de este cereal, duplicando la superficie sembrada con otros cultivos importantes en la sierra como la papa, el fríjol, el trigo y la cebada (Encuesta de Superficies y Producción Agropecuarias Continua) (ESPAC, 2018). Lamentablemente, el rendimiento de este tipo de maíz alcanza hasta 0,93 t ha^{-1} para el grano seco, y 3,75 t ha^{-1} para el maíz fresco, colocando al Ecuador entre los niveles de productividad más bajos de maíz harinero en Sudamérica (Boada y Espinosa, 2016).

El maíz harinoso normalmente se siembra en pequeños lotes de hasta una hectárea, y una gran proporción de estos lotes se encuentran en suelos pobres que incluyen zonas de ladera, con suelos expuestos a la erosión y sin instalaciones de riego. Además, la mayoría de los agricultores utilizan semillas no certificadas y variedades autóctonas no mejoradas. Todos estos y otros factores socioeconómicos hacen que el rendimiento del maíz sea muy bajo, lo que limita el poder adquisitivo de los agricultores y restringe el uso de insumos, como los fertilizantes.

El rendimiento del maíz está estrechamente relacionado con la disponibilidad de nutrientes del suelo. Para el maíz cultivado en el altiplano se recomienda aplicar 80 kg ha^{-1} de nitrógeno y 40 kg ha^{-1} de fósforo en suelos de mediana fertilidad (Yánez y col., 2013). Después del nitrógeno, el fósforo es uno de los elementos más importantes en las primeras etapas del desarrollo de la planta, y una deficiencia de estos elementos en el cultivo puede provocar un crecimiento lento, poco desarrollo del sistema radicular y por lo tanto un bajo rendimiento de la cosecha (Guzmán, 2012). Las bacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPB) facilitan el crecimiento de las plantas, aportando nitrógeno o fósforo fijado, e inducen la producción de fitohormonas durante la colonización de las raíces. Estas fitohormonas producen cambios fisiológicos en la planta que favorecen una mayor absorción de nutrientes, promueven el crecimiento y aumentan la producción (Glick, 2012; Santoyo y col., 2016).

Actualmente es necesario investigar la microbiota del suelo para obtener estrategias para mejorar la productividad agrícola. Una de estas estrategias es la aplicación de bioinoculantes con microorganismos que una vez aplicados al suelo o a la semilla generan un impacto positivo en la nutrición y en el rendimiento de las plantas (Glick, 2012; Díaz-Blanco y Márquez-Reina, 2011). El uso de bioinoculantes elaborados a partir de microorganismos benéficos, como *Azospirillum* sp. y *Pseudomonas fluorescens*, que viven asociados o en simbiosis con las raíces del maíz, puede contribuir a la fijación de nitrógeno, solubilización de fósforo y fertilidad natural del suelo, proporcionando un efecto agrobiológico positivo que constituye una alternativa importante para la reducción o sustitución parcial de los fertilizantes minerales (Grageda y col., 2012; Pereira y col., 2020).

El estudio y manejo de los microorganismos benéficos ha ido incrementando. La producción y comercialización de bioinoculantes tiene como objetivo fortalecer un sistema de producción sostenible con un equilibrio ecológico del suelo (Ruiz, 2015; Urrutia, 2019). Varios estudios han demostrado los beneficios del uso de bioinoculantes o biofertilizantes en maíz dentado y flint en tierras bajas, incrementando el rendimiento y la rentabilidad para los agricultores, pero los reportes acerca del maíz harinoso en tierras altas son escasos. En México, García, Mendoza-Herrera y Mayek-Pérez (2012) mostraron que la inoculación con *A. brasilense* aumentó el rendimiento del grano en comparación con el control no fertilizado y no inoculado, aumentando el coste/beneficio en un 56 % aproximadamente. Posteriormente, Martínez-Reyes y col. (2018) reportaron que el uso de un biofertilizante con *A. brasilense* incrementó el rendimiento de grano hasta en un 28,0 % (1,67 t ha^{-1}) con respecto al control absoluto, logrando un mayor beneficio neto que el uso de la fertilización química convencional. En Brasil, Pereira y col. (2020) reportaron que el uso de bioinoculantes incrementó el rendimiento de grano hasta un 39,5 y 34,7 % cuando la semilla de maíz se inoculó con *Bacillus subtillis* y *A. brasilense*, respectivamente.

El Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias-INIAP cuenta con una colección de cepas de *Azospirillum* sp. y *P. fluorescens* aisladas de la rizosfera de plantas de maíz, recolectadas a lo

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

largo de la sierra ecuatoriana. Estas cepas han sido caracterizadas y evaluadas, y como resultados la cepa C2 de *Azospirillum* sp. y la cepa *nI5* de *P. fluorescens* con una concentración de 1×10^9 ufc mL^{-1} han mostrado los mejores resultados en estudios preliminares (Rivadeneira, 2012; Pincay, 2014; Sangoquiza, Yánez y Borges, 2019). Los objetivos de esta investigación fueron evaluar el efecto de estas cepas nativas andinas en la producción de maíz harinoso fresco ("elotes" o "choclos") y estimar el coste/beneficio de la inoculación.

2 Materiales y Métodos

2.1 Área de estudio

El experimento se llevó a cabo en un campo de producción comercial de maíz ubicado en la provincia de Pichincha, Ecuador, en la parroquia de Amaguaña (0°23'9.87" S y 78°30'3.4" O), a una altura de 2 675 msnm, durante el ciclo 2017-2018. La temperatura media de Amaguaña es de 17°C con una precipitación media de 960 mm (Bastidas, 2016).

2.2 Cepas bacterianas y bioinoculante

El inóculo se desarrolló a partir de la cepa liofilizada C2 de *Azospirillum* sp., aislada de 'Laguacoto', parroquia Veintimilla, cantón Guaranda, provincia de Bolívar, y la cepa nl5 de *P. fluorescens* aislada de 'Tunibamba' de la parroquia 'El Sagrario' cantón Cotacachi, provincia de Imbabura. Las cepas fueron recolectadas de la rizosfera de plantas de maíz cultivadas en la sierra de Ecuador (Carrera, 2012; Pincay, 2014). Las cepas se conservan en el laboratorio del Programa de Maíz de la Estación Experimental Santa Catalina del INIAP. El inóculo y la inoculación de las semillas se realizaron según lo reportado por Sangoquiza, Yánez y Borges (2019). Brevemente, se colocaron 1000 μL de peptona al 1% en los tubos Eppendorf, agitando hasta homogeneizar la mezcla con la ayuda del vortex. Posteriormente, se tomaron 50 μL del inóculo y se colocaron en placas de Petri con el medio de cultivo rojo Congo de ácido málico sólido para el caso de *Azospirillum* sp. y *King B* para *P. fluorescens*. Posteriormente, el inóculo se colocó en una incubadora a 30°C durante 7 días. Transcurrido este tiempo, se tomaron secciones puras de las bacterias y se colocaron en placas de Petri con los medios de crecimiento específicos.

El bioinoculante se realizó en un soporte líquido con 2% de melaza con agua destilada estéril, pH 7, a una concentración bacteriana de 1×10^9 ufc mL^{-1}. En 300 mL de la solución de bioinoculante, 280 mL correspondieron al soporte líquido y 20 mL a las bacterias (10 mL de *Azospirillum* sp. y 10 mL de *P. fluorescens*). La concentración de bacterias se midió con un espectrofotómetro (Thermo Scientific, GENESYS), y se obtuvo al alcanzar el valor de 1 en la absorbancia, lo que se confirmó mediante pruebas de crecimiento por dispersión en una placa. El recuento de ufc se realizó mediante diluciones seriadas. El bioinoculante se aplicó directamente a la semilla en el momento de la siembra, tal y como indican Yánez, Clavijo y Cool Zambrano (2010). Brevemente, se colocaron 420 semillas de maíz en un recipiente de plástico con una capacidad de 5 L. Luego, se aplicaron 200 mL del bioinoculante a la semilla, mezclándolo uniformemente para asegurar el contacto con la superficie de la semilla. Tras la inoculación, la semilla se dejó reposar a la sombra durante una hora, antes de utilizarla para la siembra.

La prueba de viabilidad de las bacterias se realizó con los 100 mL restantes del bioinoculante. La evaluación de la viabilidad se realizó tomando una muestra del bioinoculante en la que se hicieron diluciones seriadas, tomando 0,1 mL de cada dilución y sembrando en placas de Petri con el medio de cultivo específico para cada bacteria. Estas se incubaron a 30°C durante 7 días. La presencia de bacterias se determinó por recuento en placa.

2.3 Diseño experimental

La siembra se realizó en un suelo franco arenoso al inicio de la temporada de lluvias en el mes de noviembre, con la variedad de maíz harinoso INIAP-101 (Caviedes, 2013). Los tratamientos correspondieron a: T1 (*Azospirillum* sp; 1×10^9 ufc mL^{-1}), T2 (*P. fluorescens*; 1×10^9 ufc mL^{-1}), T3 (*Azospirillum* sp. y *P. fluorescens*; 1×10^9 ufc mL^{-1}), T4 (control, fertilización química convencional) y T5 (control absoluto). La fertilización química se aplicó únicamente en las parcelas correspondientes al tratamiento T4. La fertilización en base a los resultados del análisis de suelo (Tabla 1) fue de 57 kg de N ha^{-1}, 57 kg de P_2O_5 ha^{-1}, 10 kg K_2O ha^{-1}, 25 kg S ha^{-1}, y 10 kg de Mg ha^{-1}, distribuyendo equitativamente el nitrógeno entre la siembra y la cuesta, que se realizó 45

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

días después de la siembra. Los demás nutrientes se aplicaron en el momento de la siembra. El tamaño de cada parcela fue de cuatro surcos de 5,00 m de largo y 3,20 m de ancho, con 80 plantas en cada parcela. La distancia de plantación fue de 0,80 m entre hileras y 0,25 m entre plantas, con una densidad de 50 000 plantas ha^{-1}. El contenido nutricional del suelo donde se plantó el experimento que se analizó en el Departamento de Suelos de la Estación Experimental Santa Catalina, se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1. Valores nutricionales del suelo de Amaguaña donde se evaluó el efecto de la inoculación de *Azospirillum* y *Pseudomonas* en maíz harinoso.

Nutrientes	Valor	Unidad
N	57,0	ppm
P	11,0	ppm
S	4,70	ppm
K	0,59	meq 100 mL^{-1}
Ca	5,90	meq 100 mL^{-1}
Mg	1,90	meq 100 mL^{-1}
Zn	0,90	ppm
Cu	7,60	ppm
Fe	350	ppm
Mn	3,40	ppm
B	0,30	ppm
MO	4,40	%
pH	6,36	

Las prácticas agronómicas del cultivo se realizaron siguiendo las recomendaciones dadas a los pequeños agricultores (Yánez y col., 2013). En resumen, se realizó un pase de arado y un pase de rastra para incorporar los restos del cultivo anterior (maíz). Durante el desarrollo del cultivo se eliminaron manualmente las malezas y se controlaron las plagas de insectos con dos aplicaciones de insecticidas (Cipermetrina y Clorpirifos) a los 60 y 120 días, con a dosis de 1 L ha^{-1}. El cultivo se cosechó y evaluó en estado fresco (maíz fresco), en el estado de crecimiento R3 (estado lechoso), a los 150 días de la siembra (Yánez y col., 2013).

2.4 Variables evaluadas

La evaluación agronómica se llevó a cabo en la cosecha, según los procedimientos del Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT) para ensayos internacionales (CIMMYT, 1999). A continuación se detalla la evaluación de las variables:

- **Altura de la planta**: se midió la longitud desde la base de la planta hasta el punto en que la panícula comienza a dividirse, en diez plantas seleccionadas al azar en los surcos centrales de cada parcela. Esta variable se registró en m utilizando un medidor de altura en la cosecha.
- **Longitud de la raíz**: se tomaron 10 plantas al azar de los surcos centrales de la parcela en el momento de la cosecha. Se separó la parte aérea de las plantas y se midió la longitud de la raíz desde la base de la planta hasta la punta de la raíz más larga con la ayuda de un metro. Esto se midió en cm.
- **Longitud de la mazorca**: se midieron diez mazorcas con brácteas tomadas al azar en los surcos centrales de cada parcela desde la base hasta la punta de la mazorca con la ayuda de una cinta métrica. Se midió en cm.
- **Diámetro de la mazorca**: se midió con un calibre el punto central de 10 mazorcas elegidas al azar de los surcos centrales con brácteas de cada tratamiento, los datos se expresaron en cm.
- **Rendimiento**: se cosecharon mazorcas con brácteas, aptas para el consumo en fresco en la etapa R2-3 (“elote”, “choclo”), de los dos surcos centrales (40 plantas) de cada parcela experimental. El rendimiento de maíz fresco se registró en kg, pero los datos se muestran como t ha^{-1}.
- **Índice de efectividad de la inoculación (IEI)**: se calculó en porcentaje utilizando la Ecuación 1 (Escobar y col., 2011).
- **Coste/beneficio**: se estimó a partir de los ingresos por la venta del maíz fresco cosechado y el coste de producción (insumos, mano de obra, preparación del suelo y costes indirectos) de cada tratamiento. El ingreso bruto (USD ha^{-1}) se estimó multiplicando el rendimiento de maíz fresco (t ha^{-1}) por su valor comercial (USD t^{-1}). El beneficio neto por hectárea se estimó por la diferencia entre el ingreso bruto en dólares y el coste de producción. El coste por cada dólar obtenido (CU) se calculó dividiendo el coste de producción (USD ha^{-1}) por el ingreso bruto (USD ha^{-1}), y la relación coste-beneficio (C/B) se estimó dividiendo el beneficio neto (USD ha^{-1}) por el coste de producción (USD ha^{-1}).

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

$$IEI\,(\%) = \frac{(\text{rendimiento del tratamiento inoculado} - \text{rendimiento del control absoluto})}{(\text{rendimiento del control absoluto})} \times 100 \qquad (1)$$

2.5 Análisis estadístico

Se utilizó un diseño de bloques completamente al azar con seis repeticiones para evaluar el efecto de tres bioinoculantes (T1, T2 y T3) y dos controles (T5 y T6). Los resultados se sometieron a una prueba de normalidad modificada de Shapiro-Wilks, y a continuación se realizó un análisis de la varianza y una prueba de comparación múltiple de Tukey ($p < 0,05$) para todos los rasgos agronómicos. Para el análisis se utilizó el programa estadístico INFOSTAT.

3 Resultados

La Tabla 2 muestra los resultados de los rasgos agronómicos evaluados en los diferentes tratamientos. Se observaron diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$) entre los tratamientos para todas las características. El control absoluto, como era de esperar, mostró los valores más bajos y la clasificación más baja de la prueba de Tukey, lo que significa el peor rendimiento agronómico. El uso de la fertilización química convencional (T4) mostró la mayor altura de la planta con 2,44 m, y aunque no se diferenció estadísticamente de los tratamientos inoculados (T1, T2 y T3), sí lo hizo del testigo absoluto (T5), que obtuvo las plantas más cortas con 2,20 m.

El rendimiento de maíz fresco obtenido con el uso de bioinoculantes (T1, T2 y T3) no difirió estadísticamente del rendimiento obtenido con la fertilización química (T4), según la prueba de Tukey ($p < 0,05$). Esto fue consistente con el rendimiento observado en la altura de la planta, la longitud de la mazorca y la longitud de la raíz. El IEI de la inoculación con *Azospirillum* sp. y *P. fluorescens* (T3) fue de 46,58 %, casi el doble que cuando se realizó solamente con la bacteria (T1 o T2) (Tabla 2). El uso del bioinoculante con ambos aislados (T3, *Azospirillum* sp. y *P. fluorescens*) mostró el mejor rendimiento agronómico para el diámetro de la mazorca, el rendimiento y el IEI (Tabla 2). No hubo diferencias significativas ($p > 0,05$) entre el T3 y el control de fertilización química convencional (T4) para ninguno de las características evaluados, excepto para el diámetro de la mazorca, donde T3 obtuvo mazorcas más gruesas que T4, con 21,47 cm y 20,13 cm, respectivamente.

La evaluación económica mostró el coste/beneficio de la aplicación de estos bioinoculantes en el maíz harinoso (Tabla 3). La inoculación de las semillas realizada con el biofertilizante combinado T3 (*Azospirillum* sp. y *P. fluorescens*) obtuvo el mayor beneficio neto 3546,00 USD ha^{-1}, y la mayor relación C/B 1,35. Aunque el coste de producción del bioinoculante combinado (T3) fue mayor que el de los bioinoculantes con un solo aislado (T1 y T2), el ingreso bruto de T3 fue mayor debido al incremento de rendimiento obtenido al inocular con ambos aislados (Tabla 2).

Tabla 2. Efecto de la aplicación de bioinoculantes en las características agronómicas del cultivo de maíz harinoso INIAP 101. Tratamientos: T1 (*Azospirillum* sp.), T2 (*P. fluorescens*), T3 (*Azospirillum* sp. y *P. fluorescens*), T4 (control, fertilización química convencional) y T5 (control absoluto).

Tratamiento	Altura de la planta (m)	Longitud de la mazorca (cm)	Diámetro de la mazorca (cm)	Longitud de la raíz (cm)	Rendimiento del maíz fresco (t ha^{-1})	IEI (%)
T1	2,37 ab*	38,33 a	21,20 a	38,67 a	16,72 b	22,68 b
T2	2,42ab	35,83 ab	21,00 a	32,67 bc	17,05 b	23,68 b
T3	2,33 ab	37,50 ab	21,47 a	37,00 ab	19,70 a	46,58 a
T4	2,44 a	36,33 ab	20,13 b	34,17 abc	17,12 ab	-
T5	2,20 b	32,33 b	18,47 c	31,00 c	13,58 c	0,00 c

IEI = Índice de eficacia de la inoculación. *Las letras minúsculas diferentes significan una diferencia estadística significativa según el test de Tukey ($p < 0,05$).

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

4 Discusión

4.1 Efecto de la aplicación de bioinoculantes en las características agronómicas del maíz

El uso de bioinoculantes con *Azospirillum* sp. y *P. fluorescens* en maíz de harina fresca mostró el mismo rendimiento agronómico que el uso de la fertilización química convencional (Tabla 2). Los resultados obtenidos en este estudio podrían atribuirse a que estas bacterias tienen la capacidad de fijar nitrógeno, solubilizar fósforo y producir compuestos que estimulan el crecimiento vegetal (Aguirre y Espinosa Moreno, 2016; Rueda y col., 2016). Estas bacterias promovieron el crecimiento y desarrollo de las plantas de maíz harinoso, mostrando raíces más largas, plantas más altas y mazorcas más gruesas que el control absoluto (T5). Los cereales inoculados con estas bacterias han mostrado una mayor capacidad de absorción eficiente de agua y nutrientes del suelo (Sala y col., 2005; Oliveira y col., 2018; Pereira y col., 2020).

Los bioinoculantes basados en cepas de *Azospirillum* y *Pseudomonas* tienen una alta capacidad de producir ácido indolacético (AIA) provocando el desarrollo de las raíces y la elongación celular. Existen estudios que muestran la influencia de *Azospirillum* en la formación de raíces laterales debido a la secreción de nitritos (Camelo, Vera y Bonilla, 2011; Bécquer y col., 2012). La producción de AIA y la alta sensibilidad de las raíces a esta hormona son fundamentales para la respuesta a la inoculación de *Azospirillum* y *Pseudomonas*, donde frecuentemente se observa un mayor desarrollo radical, lo que se traduce en una mayor superficie de absorción de nutrientes, y, por tanto, un mayor desarrollo de la parte aérea de la planta (García y col., 2007).

El maíz harinoso INIAP 101 mostró un incremento en la altura de la planta, la longitud de la mazorca y el diámetro de las plantas inoculadas, en comparación con el control absoluto (Tabla 2). Estos resultados concuerdan con Piscoya y Ugaz (2016), quienes señalaron que las especies de Azospirillum presentaron un incremento en la altura, número de hojas y diámetro de tallos en el cultivo de maíz duro, mientras que Piromyou y col. (2011) demostraron la acción benéfica de la inoculación individual y mixta de microorganismos benéficos en el cultivo de maíz dentado, al mejorar su funcionamiento radical en la absorción del nitrógeno e invadir externamente la raíz del maíz, favoreciéndolo con la síntesis de sustancias promotoras del crecimiento vegetal.

La cepa C2 de *Azospirillum* sp. y la cepa nl5 de *P. fluorescens* utilizadas en este estudio han demostrado su capacidad de promover la absorción de nitrógeno y fósforo. Sangoquiza, Yánez y Borges (2019) reportaron un mayor porcentaje de acumulación de nitrógeno y fósforo en el tejido de las hojas de las plantas INIAP-101 inoculadas con estos aislamientos. Estudios similares sobre el efecto de *Azospirillum* sp. mostraron un mayor porcentaje de nitrógeno en el tejido foliar del maíz (Ortíz, 2010), mientras que la inoculación de *A. brasilense* y *P. fluorescens* aumentó el contenido de fósforo total en 187 kg ha^{-1} (Faggioli y col., 2003).

Tabla 3. Evaluación económica de la aplicación de bioinoculantes en el maíz harinoso INIAP 101 en la sierra del Ecuador.

	Tratamiento	Costo de producción (USD ha^{-1})	Ingreso bruto (USD ha^{-1})	Beneficio neto (USD ha^{-1})	CU* (USD)	Coste/beneficio (USD)
T1	*Azospirillum* sp.	1505,74	3009,60	1503,86	0,50	1,00
T2	*P. fluorescens*	1505,74	3069,00	1563,26	0,49	1,04
T3	*Azospirillum* sp. + *P. fluorescens*	1511,74	3546,00	2034,26	0,43	1,35
T4	Control, fertilización química	1792,86	3081,60	1288,74	0,58	0,72
T5	Control absoluto	1491,86	2444,40	952,54	0,61	0,64

*CU = Costo por cada dólar obtenido

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

4.2 Índice de efectividad de la inoculación (IEI) de los bioinoculantes

Para el IEI, el tratamiento T3 mostró diferencias estadísticamente significativas con los tratamientos T1 y T2 según la prueba de Tukey ($p < 0,05$) (Tabla 2). Estos resultados indicaron que la combinación de Azospirillum y P. fluorescens favoreció el rendimiento del maíz, lo que sugiere una simbiosis asociativa que puede mejorar la morfología y fisiología de las raíces, logrando un mejor aprovechamiento del agua y de nutrientes como el nitrógeno y el fósforo, generando una mejor calidad y desarrollo del grano (Gálvez, Magallón y Torres, 2014). Martins y col. (2018) señalaron que los efectos de estos microorganismos en el desarrollo de las plantas han favorecido el rendimiento de diversos cultivos cuando se aplican solos o en combinación, logrando una mayor colonización y aumentando la producción. Una revisión más detallada de los beneficios de los biofertilizantes fue publicada recientemente por Zambrano-Mendoza y col. (2021).

4.3 Evaluación económica del uso de los bioinoculantes

El análisis de los parámetros económicos mostró la ventaja de aplicar estos bioinoculantes al promover un buen desarrollo de las plantas inoculadas y un mayor rendimiento económico (Tabla 3). El mayor coste de producción se obtuvo con el T4 (control de fertilización química convencional), mientras que el menor coste de producción se obtuvo con el T5 (control absoluto), donde no se aplicó ninguna fertilización ni bioinoculante. La principal diferencia entre los costos de producción de cada tratamiento se debió al valor del fertilizante químico y el coste de su aplicación. En relación con la recomendación química convencional (T4), el uso del bioinoculante T3 (*Azospirillum* y *P. fluorescens*) permitió un ahorro de 281,12 USD ha^{-1}, lo que representa una disminución de aproximadamente 16 % en el costo de producción, sin afectar significativamente el rendimiento (Tabla 2). Esto demuestra que es posible sustituir el uso de fertilizantes químicos por bioinoculantes sin afectar la producción de maíz, abriendo la oportunidad a sistemas de producción más sustentables y amigables con el medio ambiente.

Muchos productores de maíz de la sierra no utilizan fertilizantes químicos, asemejándose al tratamiento T5 (control absoluto). Con el uso de *Azospirillum* y *P. fluorescens*, los agricultores pueden duplicar su beneficio neto de 952,54 USD ha^{-1} a 2034,26 USD ha^{-1} con una inversión adicional de aproximadamente 20,0 USD ha^{-1} (Tabla 3). Otros estudios llevados a cabo en diversas condiciones ambientales podrían aclarar esta posibilidad.

El C/B de la producción de maíz fresco utilizando el bioinoculante T3 (*Azospirillum* y *P. fluorescens*) aumentó en un 87,5 % en relación con la fertilización química convencional (T4) (Tabla 3). Este valor es superior al incremento de 56,0 % reportado por García, Mendoza-Herrera y Mayek-Pérez (2012), y al incremento de 36,0 % reportado por García y col. (2007), cuando evaluaron el efecto de la aplicación de A. brasilense en maíz dentado en el norte de México. En términos económicos, estos resultados mostraron que la inoculación con bacterias promotoras del crecimiento vegetal (*Azospirillum* sp. y *P. fluorescens*) incrementó el beneficio neto y la relación C/B del cultivo de maíz; por lo tanto, el uso de estos bioinoculantes podría generar una tecnología económicamente viable para la producción de maíz harinoso en la Región Andina.

5 Conclusiones

La inoculación con *Azospirillum* sp. mejoró el rendimiento de maíz fresco ("choclo"), aumentó el desarrollo de la raíz, y el diámetro y la longitud de la mazorca en comparación con el testigo. La inoculación con *P. fluorescens* mostró un mayor rendimiento y diámetro de la mazorca en comparación al control. La combinación entre *Azospirillum* sp. y *P. fluorescens* aumentó significativamente el rendimiento de maíz fresco en un 46,58 % con relación al control sin fertilización. El rendimiento de las plantas tratadas con fertilizante químico fue similar al obtenido con las plantas inoculadas con estos microorganismos. La combinación de *Azospirillum* sp. y *P. fluorescens* produjo la mayor ganancia neta y relación C/B, aumentando en un 87,5 % el C/B de la fertilización química convencional.

Azospirillum sp. y *P. fluorescens* redujeron el uso de fertilizantes sintéticos en aproximadamente un 50 %, reduciendo el coste de producción. Esto demostró que es factible sustituir el uso de fertilizantes sintéticos por biofertilizantes, abriendo la posibi-

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

lidad de un sistema de producción de maíz sostenible y respetuoso con el medio ambiente en la sierra ecuatoriana.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Programa Coreano de Agricultura Internacional -KOPIA- y al proyecto "Desarrollo de tecnologías de cultivo de maíz y maíz utilizando biofertilizantes en la Sierra del Ecuador", por financiar la evaluación del bioinoculante.

Contribución de los autores

CASC; Investigación, Escritura. JLZM; Escritura, revisión y edición. MBG; Conceptualización. KJC; Validación.

Referencias

Aguirre, J. y J. Espinosa Moreno (2016). «Crecimiento y rendimiento de Capsicum annuum L. inoculado con endomicorriza y rizobacterias». En: *Revista mexicana de ciencias agrícolas* 7.7, 1539-1550. Online:https://n9.cl/hmfv8.

Bastidas, W. (2016). «Guía climática agroecoturística para el Cantón Quito-Provincia de Pichincha 2014». Tesis de mtría. Universidad Central del Ecuador.

Bécquer, C. y col. (2012). «Efecto de la inoculación con bacterias rizosféricas en dos variedades de trigo. Fase II: invernadero». En: *Revista mexicana de ciencias agrícolas* 3.5, 985-997. Online:https://bit.ly/3ekmwhF0.

Boada, R. y J. Espinosa (2016). «Factores que limitan el potencial de rendimiento del maíz de polinización abierta en campos de pequeños productores de la Sierra de Ecuador». En: *Siembra* 3.1, 67-82. Online:https://bit.ly/2TDxHKo.

CIMMYT (1999). *Manejo de los ensayos e informes de los datos para el Programa de Ensayos Internacionales de Maíz del CIMMYT*. CIMMYT.

Camelo, M., S. Vera y R. Bonilla (2011). «Mecanismos de acción de las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal». En: *Ciencia & Tecnología Agropecuaria* 12.2, 159-166. Online:https://bit.ly/2ZEW51X.

Carrera, A. (2012). «Caracterización bioquímica, molecular y funcional del banco de cepas de Azospirillum spp. del INIAP aisladas de la rizósfera del cultivo de maíz (Zea mays L.) de la sierra ecuatoriana». Tesis de mtría. Escuela Superior Politécnica del Ejercito.

Caviedes, C. (2013). *Variedad de maíz blanco precoz. Quito, EC, INIAP, Estación Experimental Santa Catalina, Programa de Maíz*. INIAP.

Díaz-Blanco, P. y E. Márquez-Reina (2011). «Validación de los biofertilizantes Azotobacter, Rhizobium y fosforina en cuatro sistemas de cultivos en condiciones de producción». En: *Avances* 13.2, 1-9. Online:https://bit.ly/36vobhK.

ESPAC (2018). *Visualizador de estadísticas agropecuarias del Ecuador ESPAC*.

Escobar, C. y col. (2011). «Caracterización de cepas nativas de Azotobacter spp. y su efecto en el desarrollo de Lycopersicon esculentum Mill."tomate" en Lambayeque». En: *Scientia Agropecuaria* 2.1, 39-49. Online:https://bit.ly/3V12cHR.

Faggioli, V. y col. (2003). *Fertilizantes biológicos en maíz: ensayo de inoculación con cepas de Azospirillum brasilense y Pseudomonas fluorescens*. Inf. téc. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Online: https://bit.ly/36zMtqE.

Gálvez, G., R. Magallón y L. Torres (2014). «Evaluación de biofertilizantes líquidos en la producción de elote y grano en maíz». En: *e-Cucba* 1.1, 15-20. Online:https://bit.ly/36v53Av.

García, J., A. Mendoza-Herrera y N. Mayek-Pérez (2012). «Efecto de Azospirillum brasilense en el rendimiento del maíz en el norte de Tamaulipas, México». En: *Universidad y ciencia* 28.1, 79-84. Online:https://bit.ly/3gtDLPl.

García, J. y col. (2007). «Efecto de cepas de Azospirillum brasilense en el crecimiento y rendimiento de grano del maíz». En: *Revista Fitotecnia Mexicana* 30.3, 305-305. Online:https://bit.ly/2X5L48i.

Glick, B. (2012). «Plant growth-promoting bacteria: mechanisms and applications». En: *Scientifica* 2012. Online:https://bit.ly/3GyR2Wi.

Grageda, O.A. y col. (2012). «Impacto de los biofertilizantes en la agricultura». En: *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 3.6, 1261-1274. Online:https://bit.ly/2ZEOAIt.

Guzmán, A. (2012). «Aislamiento y caracterización de bacterias solubilizadoras de fósforo a partir de cuatro suelos de la provincia de Chimbora-

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

zo». Tesis de mtría. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Martínez-Reyes, L. y col. (2018). «Biofertilización y fertilización química en maíz (Zea mays l.) en Villaflores, Chiapas, México». En: *Siembra* 5.1, 26-37. Online:https://bit.ly/2ABEUUQ.

Martins, T. y col. (2018). «Inoculation efficiency of Azospirillum brasilense on economising nitrogen fertiliser in landrace popcorn». En: *Revista Ciência Agronômica* 49, 283-290. Online:https://bit.ly/3gsAtvZ.

Oliveira, I. y col. (2018). «Inoculation with Azospirillum brasiliense increases maize yield». En: *Chemical and Biological Technologies in Agriculture* 5.1, 1-9. Online:https://bit.ly/3CqtMWe.

Ortíz, G.M. (2010). «Evaluación del efecto de cuatro métodos de inoculación de dos cepas de Azospirillum spp., en el cultivo de maíz (Zea mays L.), variedades Iniap 122 y 102, en las provincias de Imbabura y Pichincha». Tesis de mtría. Universidad Técnica de Ambato.

Pereira, N. y col. (2020). «Corn yield and phosphorus use efficiency response to phosphorus rates associated with plant growth promoting bacteria». En: *Frontiers in Environmental Science* 8, 40. Online:https://bit.ly/2A7Th2X.

Pincay, A. (2014). «Caracterización y evaluación de bacterias Pseudomonas sp. solubilizadoras de fósforo, presentes en la rizósfera de maíz (Zea mays L)». Tesis de mtría. Universidad de las Fuerzas Armadas.

Piromyou, P. y col. (2011). «Effect of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) inoculation on microbial community structure in rhizosphere of forage corn cultivated in Thailand». En: *European Journal of Soil Biology* 47.1, 44-54. Online:https://bit.ly/2AWUKcz.

Piscoya, E. y Z. Ugaz (2016). «Efecto de Azospirillum, Azotobacter y Enterobacter spp. nativas con 50% de fertilizante químico en el desarrollo vegetativo y rendimiento de Zea mays L."maíz.ªmarillo duro en Lambayeque». Tesis de mtría. Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.

Rivadeneira, M. (2012). «Evaluación del biofertilizante a base de cepas de Azospirillum spp. en el cultivo de maíz (Zea mays L.) "INIAP-111 Guagal mejorado", en complemento con tres tipos de fertilización y dos métodos de inoculación, en la granja Laguacoto II, provincia Bolívar». Tesis de mtría. Universidad Estatal de Bolívar.

Rueda, D. y col. (2016). «Effect of Azospirillum spp. and Azotobacter spp. on the growth and yield of strawberry (Fragaria vesca) in hydroponic system under different nitrogen levels». En: *Journal of Applied Pharmaceutical Science* 6.1, 048-054. Online:https://bit.ly/3el2CTK.

Ruiz, J. (2015). «Evaluación de cepas de (Azospirillum sp.) y mallas sombra de colores sobre la morfología y bioquímica de la lechuga». Tesis de mtría. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.

Sala, V. y col. (2005). «Ocorrência e efeito de bactérias diazotróficas em genótipos de trigo». En: *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 29, 345-352. Online:https://bit.ly/2AdumuA.

Sangoquiza, C., C. Yánez y M. Borges (2019). «Respuesta de la absorción de nitrógeno y fósforo de una variedad de maíz al inocular Azospirillum sp. y Pseudomonas fluorescens». En: *ACI Avances En Ciencias E Ingenierías* 11.1, 8-19. Online:https://bit.ly/2M3aX2o.

Santoyo, G. y col. (2016). «Plant growth-promoting bacterial endophytes». En: *Microbiological research* 183, 92-99. Online:https://bit.ly/3c2xBCp.

Urrutia, E. (2019). «Aplicación de bioestimulantes trihormonales en el cultivo de maíz (*Zea mays* L.) variedad chingasino para rendimiento de choclo». Tesis de mtría. Universidad Nacional del Centro del Perú.

Yánez, G., F. Clavijo y C. Cool Zambrano (2010). *Biofertilizante. Fertibacter-maíz*. Inf. téc. INIAP.

Yánez, G. y col. (2013). *Guía de producción de maíz de altura*. Inf. téc. INIAP.

Zambrano-Mendoza, J. y col. (2021). *Use of Biofertilizers in Agricultural Production*. IntechOpen.

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

La granja:
Revista de
Ciencias de la Vida
pISSN:1390-3799; eISSN:1390-8596
http://doi.org/10.17163/lgr.n39.2024.10

Artículo científico / Scientific paper

Ciencias Agrícolas

Efecto de la densidad de plantas sobre los componentes del rendimiento de fréjol cultivado en condiciones de campo en un valle interandino de Ecuador

Effect of plant density on yield components of common bean grown under inter-Andean mountain conditions of Ecuador

Santiago C. Vásquez*[1], Edwin Israel Villavicencio Sanchez[1], Alex O. Guamán[1], Marlene Molina-Müller[1] y Camilo Alexander Mestanza Uquillas[2]

[1]*Carrera de Agronomía, Facultad Agropecuaria y de Recursos Naturales Renovables, Universidad Nacional de Loja. Campus La Argelia, 110150, Loja, Ecuador.*
[2]*Facultad de Ciencias Pecuarias. Universidad Técnica Estatal de Quevedo, 120501, Quevedo, Ecuador.*

*Autor para correspondencia: santiagovasquezm@gmail.com

Manuscrito recibido el 11 de abril de 2021. Aceptado, tras revisión, el 02 de diciembre de 2021. Publicado el 1 de marzo de 2024.

Resumen

El fréjol es un cultivo importante debido a su alto valor nutritivo. En los últimos años la producción en Ecuador de este cultivo ha disminuido drásticamente debido entre otros factores a ineficientes procesos y falta de tecnificación en la producción. Entender cómo se generan y determinan los componentes del rendimiento del grano es primordial para diseñar estrategias que permitan aumentar el rendimiento del cultivo. En este estudio, se modificó la densidad de plantas con el objetivo de evaluar su impacto sobre el número de granos, peso de granos y rendimiento, bajo condiciones de campo en una región andina de Ecuador. Se realizaron dos experimentos sembrados en fechas distintas, donde se evaluaron densidades de plantas contrastantes 4 y 11 plantas m^{-2}. El efecto de los tratamientos se estudió sobre la duración del periodo emergencia - antesis, el número de vainas llenas y vanas, el número de granos, el peso seco de 100 granos y el rendimiento de grano. Los resultados indican que la densidad de plantas tiene un efecto significativo ($p<0,05$) sobre el rendimiento, alcanzando un promedio de 257,15 g m^{-2} en alta densidad y 151,45 g m^{-2} en baja densidad. Los componentes principales del rendimiento mostraron una respuesta distinta a la modificación de la densidad de plantas; el número de granos presentó una fuerte variabilidad y fue positivamente asociado con el rendimiento final del grano ($p<0,05$), mientras que el peso del grano no fue afectado.

Palabras clave: Componentes del rendimiento, densidad de siembra, fréjol, número de granos, peso de grano, *Phaseolus vulgaris*, población de plantas.

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Abstract

Common bean is an important crop due to its high nutritional value. However, its production in Ecuador has decreased due to biotic and abiotic factors. Understanding the mechanisms that determine the yield components of this crop is essential to establish strategies that allow increasing the yield. In this study, the plant density was modified to evaluate its impact on yield and its two main components, the grain number and grain weight under field conditions in an Andean region of Ecuador. Two experiments planted on different dates were performed, where two planting densities 4 and 11 plants m^{-2} were evaluated. The effect of the treatments was studied on the length of the period, from emergence to anthesis, the number of full and empty pods, grain number, 100 grain weight and grain yield. The results indicate that the plant density has a significant effect ($p<0.05$) on the yield, reaching an average of 257.15 g m^{-2} in high density, and 151.45 g m^{-2} in low density. The yield main components showed a different response to plant density modification; the grain number exhibited a strong variability and was positively associated with final grain yield ($p<0.05$) while the grain weight was not affected.

Keywords: Grain number, grain weight, *Phaseolus vulgaris*, plant density, plant population, yield components.

Forma sugerida de citar: Vásquez, S., Villavicencio Sanchez, E., Guamán, A., Molina-Müller, M. y Mestanza Uquillas, C. (2024). Efecto de la densidad de plantas sobre los componentes del rendimiento de fréjol cultivado en condiciones de campo en un valle interandino de Ecuador. La Granja: Revista de Ciencias de la Vida. Vol. 39(1):160-170. http://doi.org/10.17163/lgr.n39.2024.10.

IDs Orcid:

Santiago C. Vásquez: https://orcid.org/0000-0002-3713-020X
Edwin Villavicencio Sanchez: https://orcid.org/0000-0002-6476-489X
Alex Guamán: https://orcid.org/0000-0002-8931-3809
Marlene Molina-Müller: https://orcid.org/0000-0003-2153-9294
Camilo Mestanza Uquillas: https://orcid.org/0000-0001-9299-170X

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

1 Introducción

El fréjol (*Phaseolus vulgaris* L.) es un cultivo de gran importancia debido a su alto valor nutritivo, conteniendo entre 20 - 30% de proteína (Celmeli y col., 2018), y es uno de los cultivos importantes que se producen en varias zonas andinas de Ecuador (Valarezo y col., 2008; Bustamante, 2017). Como otras leguminosas, esta especie es usada en la rotación de cultivos para reducir los agentes causantes de enfermedades, y para mantener la fertilidad del suelo a través de la fijación de nitrógeno atmosférico (Vásquez, Mestanza y Riegel, 2015). En los últimos años en Ecuador la superficie cultivada y la producción de fréjol ha disminuido drásticamente; desde el año 2011 hasta el 2019 se estimó una disminución aproximada de 50% (FAOSTAT, 2019). Entre los factores que han contribuido a la reducción de la superficie cosechada se encuentran eventos de sequía, incidencia de patógenos, manejo deficiente del cultivo, baja tecnificación e incremento en los costos de producción, los cuales han favorecido la importación de grano de fréjol (Sistema de Información Publica Agropecuaria de Ecuador, 2018).

Incrementar la rentabilidad de este cultivo requiere mejorar la eficiencia productiva y reducir los costos de producción, para ello, el manejo de la densidad de plantas jugaría un rol importante (Calero-Hurtado y col., 2018). El rendimiento de los cultivos respondería a la modificación de la densidad de plantas, debido a que el número de plantas por unidad de superficie estaría relacionado con la tasa de crecimiento del cultivo bajo una condición particular de radiación solar y temperatura (Boada y Espinosa, 2016).

Tradicionalmente los agricultores utilizan densidades de plantas entre 15 600 a 20 800 plantas ha^{-1} con distancias entre surcos de 0,80 a 1,00 m, con la finalidad de realizar labores manuales de deshierba (Parreira, Alves y Peñaherrera-Colina, 2011), poniendo poca atención a la respuesta del rendimiento y sus componentes. Los genotipos de fréjol pueden variar en la generación de estructuras reproductivas debido a la plasticidad fenotípica en respuesta a la densidad de plantas (Andrade y Abbate, 2005), con consecuencias en la cobertura vegetal, biomasa, competencia con malezas, generación de los componentes del rendimiento y por lo tanto en rendimiento final de grano.

Algunos estudios muestran que el incremento de la densidad puede evitar pérdida de agua. En la medida en que se reduce la distancia entre surcos y se mantiene la distancia entre plantas es posible incrementar la cobertura vegetal del cultivo, y consecuentemente, reducir las pérdidas directas de agua por evaporación al cubrir más rápidamente el suelo (Osuna y col., 2012). Además, para que el cultivo de fréjol tenga ventajas competitivas con las malezas, el aumento de la densidad permite una cobertura total del suelo cuando el cultivo alcanza su pleno desarrollo vegetativo (Parreira, Alves y Peñaherrera-Colina, 2011).

El número de granos (NG) y el peso promedio de los granos (PG) son los principales componentes del rendimiento de los cultivos de grano (Peltonen-Sainio y col., 2007; Sadras, 2007; Slafer, Savin y Sadras, 2014). En muchos cultivos, el NG tiene mayor asociación con el rendimiento, mientras que el peso de grano presenta menor variación; no obstante, también se ha encontrado que el PG puede compensar la disminución del NG cuando disminuye la fuente (Ghobadi y col., 2006; Labra y col., 2017).

Estudios en fréjol han evaluado el efecto de la densidad de plantas sobre el rendimiento, principalmente en condiciones agroclimáticas tropicales y mediterráneas; sin embargo, la respuesta de los componentes del rendimiento puede variar en distintos genotipos y ambientes. Por ejemplo, Soratto y col. (2017) evaluaron densidades de 5, 7 y 9 plantas m^{-2}, y solamente encontraron diferencias en el rendimiento en un genotipo con la mayor densidad de plantas. En otro estudio, Ahmed, Razaq y Alam (2016), evaluaron densidades de 4, 5, 7 y 14 plantas m^{-2}, e informan que el peso del grano se incrementó con la menor densidad (4 plantas m^{-2}), mientras que el rendimiento se maximizó con 5 plantas m^{-2}. Por otro lado, Gabisa, Ejara y Misgana (2017), estudiaron altas densidades de plantas: 12, 15, 19 y 25 plantas m^{-2}, indicando que las densidades de 14 y 19 plantas m^{-2} presentaron los mayores rendimientos; estos antecedentes sugieren que la respuesta a la densidad de plantas está condicionada por el ambiente y el genotipo. Hasta la actualidad, existe escasa información sobre la respuesta individual de los componentes numéricos del rendimiento y su relación con el rendimiento de grano cuando se modifica la oferta de recursos en genotipos locales

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

de fréjol bajo condiciones de ambientes montañosos de zonas andinas de Ecuador.

Un mejor entendimiento de la determinación del rendimiento y sus componentes resulta un prerrequisito para el desarrollo de estrategias dirigidas a incrementar el rendimiento mediante el mejoramiento vegetal, así como para el manejo agronómico de los cultivos (Foulkes y col., 2011). El objetivo del presente trabajo es determinar el efecto de la modificación de la densidad de plantas sobre los componentes del rendimiento en fréjol cultivado en una región andina de Ecuador.

2 Materiales y Métodos

2.1 Ubicación del experimento y manejo del cultivo

El estudio se realizó en la Estación Experimental La Argelia de la Universidad Nacional de Loja ($4°02'19.2''$ S $79°12'00.6''$ W) a 2150 m.s.n.m, en un suelo de naturaleza franco limoso. Como material vegetal se utilizó fréjol arbustivo cv. Percal, que es ampliamente cultivado en la provincia de Loja, Ecuador. Previo a la siembra, se realizó una prueba de germinación de la semilla, mostrando un poder germinativo superior al 95%. Las malezas fueron controladas manualmente aproximadamente cada 20 días, iniciando desde el estado de primera hoja trifoliada hasta la etapa de llenado de grano, cubriendo el periodo crítico de interferencia de malezas informado por Ngouajio, Foko y Fouejio (1997). Cuando se observaron los primeros síntomas de daño causados por fitopatógenos se hicieron aplicaciones preventivas usando fungicida e insecticida sintéticos. Además, cuando las precipitaciones fueron escasas se aplicó riego complementario mediante aspersión. Antes de la siembra se incorporó bocashi 7 t h^{-1}, y posteriormente se fertilizó con 120 Kg ha^{-1} N parcializado en los estados fenológicos V4 y R6 (Córdova, Gepts y López, 1986).

2.2 Diseño Experimental

Se utilizó un diseño factorial con una distribución aleatoria. Se establecieron dos experimentos con fechas de siembra distinta, el Experimento 1 (E1) sembrado el 26 de octubre de 2018 y el Experimento 2 (E2) sembrado el 26 de noviembre de 2018. Los experimentos se establecieron en dos densidades de siembra, 11 plantas m^{-2} (0,60 m entre surcos y 0,30 m entre plantas) y 4 plantas m^{-2} (0,80 m entre surcos y 0,60 m entre plantas), colocando dos semillas por sitio. Las parcelas tenían una dimensión de 3,20 m de largo 2,80 m de ancho, con tres repeticiones para cada tratamiento.

2.3 Mediciones y análisis estadístico

La fenología del cultivo se registró semanalmente según la escala propuesta por Córdova, Gepts y López (1986), desde la siembra hasta madurez de cosecha. Los datos meteorológicos de temperatura, humedad relativa y precipitación se registraron diariamente mediante la estación meteorológica La Argelia-Loja (INAMHI) ubicada cerca al experimento.

Se tomaron todas las plantas en madurez de cosecha de 1 m lineal de las dos hileras centrales de cada parcela, evitando las plantas de los bordes, y se contabilizó el número de granos, el número de vainas llenas y vanas. El peso seco de los granos se determinó después de haberlos dejarlos en estufa por 3 días a 65 ± 5 °C. Con los datos de número y peso de granos se calculó el rendimiento de grano.

Para evaluar el efecto de los tratamientos, se realizó un análisis de varianza factorial y un test de medias mediante la prueba de Fisher ($\alpha = 0{,}05$). Previo al ANOVA se evaluaron los supuestos estadísticos de normalidad, independencia de las observaciones y homogeneidad de varianza. El modelo representado por la Ecuación 1 fue usado para evaluar las diferencias entre los tratamientos.

$$y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad (1)$$

Tal que y_{ijk} representa las observaciones correspondientes al nivel i del factor densidad y j al nivel del factor experimento; μ representa la media global; α_i es el efecto producido por el nivel i-ésimo del factor densidad de plantas; β_j es el efecto producido por el nivel j-ésimo del factor experimento; $(\alpha\beta)_{ij}$ es el efecto producido por la interacción entre la densidad y el experimento, y ε_{ijk} representa el error experimental.

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

3 Resultados y Discusión

3.1 Fenología y clima

La duración de la etapa siembra – antesis no estuvo afectada por la densidad de siembra ni por la fecha de siembra ($p>0,05$); en promedio el cultivo en los dos experimentos demoró 61,72 ($\pm$ 0.74) días para llegar a floración (Tabla 1). El ciclo del cultivo desde la siembra hasta la cosecha tuvo una duración aproximada de 119 y 125 días para los tratamientos de alta y baja densidad, respectivamente. La escasa diferencia en la duración de las etapas y el ciclo del cultivo entre los experimentos y densidades podría estar relacionado con la poca variación de temperatura que experimentaron las plantas de los distintos tratamientos (Figura 1), debido a que este es el principal factor que modifica la ontogenia de los cultivos (Luo, 2011). Un estudio previo en el mismo cultivar indica que el cultivo tardó 141,67 días hasta la madurez de cosecha; sin embargo, la temperatura media del ciclo fue de 12,47 °C (Goyes, 2014), sugiriendo que esta diferencia estaría dada por las temperaturas más frías que retrasaron la acumulación térmica del cultivo.

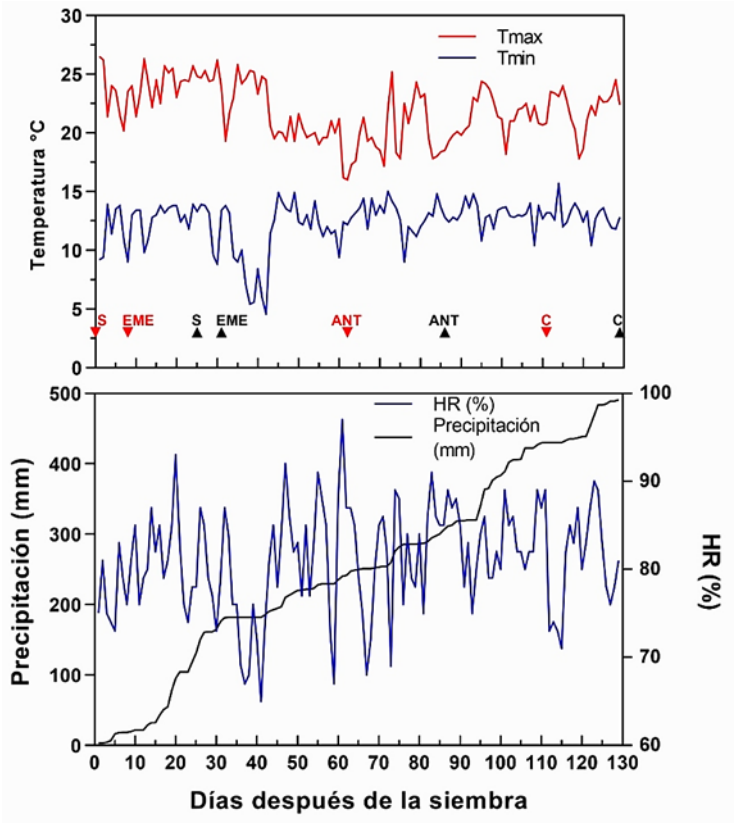

Figura 1. Esquema de la duración de las etapas fenológicas y variables climáticas de precipitación, temperatura y humedad relativa durante el ciclo de cultivo de los dos experimentos. Triángulos rojos indican el experimento 1 y triángulos negros indican el experimento 2. S (siembra), EME (emergencia), ANT (antesis), C (cosecha).

3.2 Número de vainas

Las plantas sembradas en baja densidad (4 plantas m^{-2}) tuvieron mayor número de vainas $planta^{-1}$ en comparación con las sembradas en mayor densidad (11 plantas m^{-2}), incrementado en 36,2 y 29,2% el número de vainas en el experimento 1 y 2, respectivamente ($P<0.05$). También, se encontraron diferencias significativas entre los experimentos (Tabla 1), observándose que los promedios del experimento 2 fueron menores ($P<0,05$), posiblemente debido

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

a que el experimento 2 tuvo incidencia de hongos patógenos que pudo afectar el número final de vainas (no se evaluó la incidencia de enfermedades). Cuando se analizó el número de vainas vanas no se encontraron diferencias estadísticas, sugiriendo que hubo recursos suficientes para el establecimiento y crecimiento de los granos por vaina en las densidades evaluadas.

El incremento en el número de vainas en las plantas crecidas en baja densidad sugiere que es consecuencia de una menor competencia intraespecífica, lo que derivaría en mayor disponibilidad de recursos que pudo generar incrementos en el número de ramificaciones y vainas. Algunos cultivos de grano, incluido el fréjol, tienen la capacidad de modificar su estructura como respuesta a la modificación de la fuente; trabajos previos señalan que el número de vainas es uno de los componentes más sensibles a la modificación de la densidad en fréjol (Bennett, Adams y Burga, 1977; Mondo y Nascente, 2018). Los resultados de la presente investigación están de acuerdo con antecedentes previos (Abubaker, 2008; Osuna y col., 2012; Gabisa, Ejara y Misgana, 2017), donde el incremento del número de plantas disminuye el número de vainas establecidas por cada planta en el cultivo de fréjol.

Tabla 1. Promedios del rendimiento y sus componentes y duración de la etapa siembra – antesis.

E	DS	Días hasta antesis	Vainas Planta^{-1}	Vainas Vanas Planta^{-1}	Vainas m^{-2}	Granos Vaina^{-1}	Granos Planta^{-1}	Granos m^{-2}	Peso de 100 granos (g)	Rendimiento (g m^{-2})
1	11	61,67	13,5	4,5	49,5	4,98	56,17	624,57	40,41	254,28
1	4	62	21,17	4,83	19,33	4,87	96,83	402,83	45,52	183,93
2	11	60,73	10,68	4,9	53,9	5,06	52,69	585,96	43,73	260,02
2	4	62,47	15	6,83	31,33	5,28	70,83	294,67	38,71	118,97
E. st		0,62	1,4	0,53	2,35	0,1	6,76	52,04	1,62	25,43
E		ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
DS		ns	*	ns	*	ns	*	*	ns	*
ExDS		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

*Efecto significativo p<0,05; E.st: Error estándar; ns: no significativo; E: experimento; DS: densidad de plantas (plantas m^{-2}).
Los valores son promedios de tres repeticiones.

3.3 Número de granos

En los tratamientos de densidad y experimentos evaluados no se encontraron diferencias estadísticas en el NG vaina^{-1}, en promedio se obtuvo 5 ($\pm$ 0,17) granos en cada vaina. El número de granos que quedan establecidos en cada vaina estaría relacionado con la cantidad de recursos disponibles del suelo y la fotosíntesis (Hadi y col., 2006; Lake y col., 2019). Los resultados obtenidos indican que en los rangos de densidad explorados no hubo limitación para la formación de granos en las vainas (Tabla 1), sugiriendo que cuando se modifica la disponibilidad de la fuente por la densidad de plantas, el establecimiento del número de vainas planta^{-1} es más sensible al ambiente que el NG vaina^{-1}.

Tanto el NG planta^{-1} y NG m^{-2} estuvieron afectados por la densidad de plantas (P<0,05). Como se mostró anteriormente, las plantas que crecieron en baja densidad tuvieron mayor número de vainas, sin diferencias en el número de granos establecidos por vaina; en consecuencia, el NG planta^{-1} se incrementó en 42 y 26 % en el E1 y E2, respectivamente, en comparación a las plantas sembradas en alta densidad (Tabla 1), observándose una relación positiva entre el número de vainas planta^{-1} y NG planta^{-1} (Figura 2A).

Por el contrario, cuando se considera el NG m^{-2}, se observa que este componente es significativamente superior en el tratamiento de alta densidad debido a que en este tratamiento existía mayor número de plantas por unidad de superficie; por lo tanto, el número de estructuras reproductivas también se incrementa, a pesar de que las plantas crecidas en baja densidad establecieron mayor número de vainas planta^{-1}, lo que no fue suficiente para compensar el NG m^{-2} ni el rendimiento de grano, observándose una relación negativa entre el número de vainas planta^{-1} y el rendimiento (Figura 2B). Trabajos previos también muestran una disminu-

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

ción del NG planta^{-1} cuando se incrementa la población de plantas y se modifica el arreglo espacial del cultivo de fréjol (Osuna y col., 2012; Escalante-Estrada, Rodríguez-González y Escalante-Estrada, 2015). Una vía para mejorar el rendimiento del fréjol puede ser el mejoramiento del número de vainas por planta, que como se muestra en este estudio responde satisfactoriamente a la modificación de recursos y está asociado con el rendimiento final del grano.

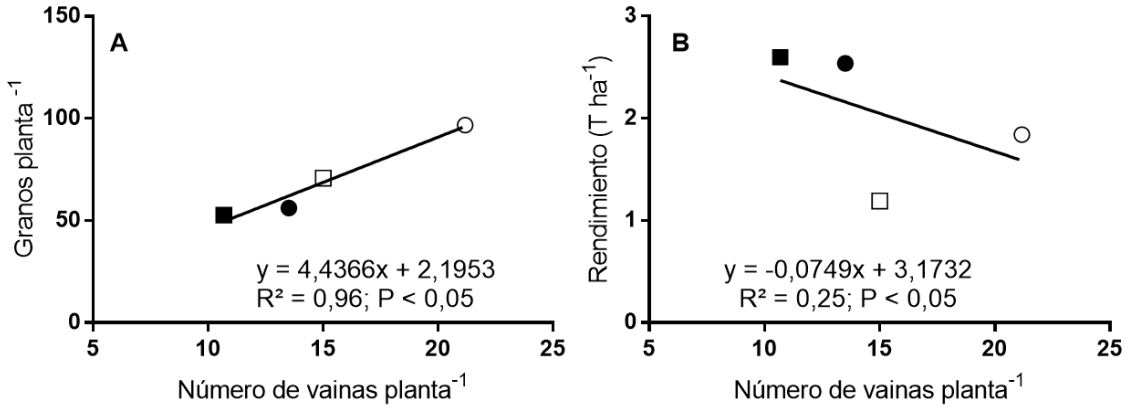

Figura 2. Relación entre el número de vainas por planta y el número de granos por planta (A), y entre el número de vainas por planta y el rendimiento del cultivo (B). Los círculos representan el experimento 1 y los cuadrados el experimento 2; símbolos llenos indican densidad 11 plantas^{-2} y símbolos vacíos indican densidad 4 plantas m^{-2}. Cada punto es promedio de tres repeticiones

3.4 Peso de granos

El peso de granos no estuvo afectado por el tratamiento de densidad en los dos experimentos (Tabla 1). En promedio el peso seco de 100 granos en cosecha fue de 42,09 g ($\pm$ 3,1) en todos los tratamientos, confirmando que este componente es más estable que el NG, apoyando la idea de que el PG tiene una característica conservadora y poco sensible a la modificación de la relación fuente – destino como se ha visto en otros cultivos de grano como soya y maíz (Sadras, 2007).

Estudios realizados con genotipos de habito determinado e indeterminado en ambientes distintos también muestran que el PG tiene poca variación cuando se modifica la densidad de plantas (Osuna y col., 2012; Escalante-Estrada, Rodríguez-González y Escalante-Estrada, 2015; Soratto y col., 2017). Estos resultados indican un alto desafío para aumentar el peso del grano posiblemente por la fuerte interacción del genotipo y ambiente ejercido sobre este componente en el fréjol como informa Pereira y col. (2017).

3.5 Rendimiento

El rendimiento del grano se vio afectado significativamente por la densidad de plantas en los dos experimentos (P<0,05). Se observó una respuesta positiva del rendimiento al aumentar el número de plantas m^{-2}, debido a que en una primera etapa el número de plantas por unidad de superficie condicionaría la formación de estructuras reproductivas en ausencia de restricción de recursos de nutrientes y radiación solar (Slafer y Rawson, 1994; Kruk y Satorre, 2003; Véliz y col., 2021a).

Los resultados sugieren que a pesar que los recursos del suelo pudieron disminuir en la alta densidad debido a la competencia intraespecífica, esto no fue limitante para la ganancia del rendimiento en el tratamiento de alta densidad, probablemente por una mayor generación de biomasa por unidad de superficie, que se tradujo en mayor intercepción de radiación fotosintéticamente activa (De Bruin y Pedersen, 2009; Véliz y col., 2021b), favoreciendo el establecimiento de mayores órganos cosechados como en estudios anteriores (Egli, 1988; Soratto y col., 2017; Calero-Hurtado y col., 2018).

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

El rendimiento en la presente investigación superó significativamente estudios previos (Calero-Hurtado y col., 2018) donde se usaron densidades superiores como 16 plantas m^{-2} con rendimiento de grano de 1 t ha^{-1}, incluso a investigaciones donde se evaluaron densidades entre 22 hasta 28 plantas m^{-2} (Puente, 2009), posiblemente por una baja eficiencia en esos sistemas de producción, lo que podría implicar mayores costos de producción debido al mayor número de plantas por unidad de superficie.

En la presente investigación se exploraron relaciones entre el rendimiento y sus componentes, cuyos resultados indican que el número de granos y vainas por unidad de superficie están estrechamente asociado con el rendimiento, como se ha visto en otros cultivos de grano (Peltonen-Sainio y col., 2007; Sadras, 2007; Slafer, Savin y Sadras, 2014). Por otro lado, el PG no tiene relación con el rendimiento (Figura 3 A, B, C). Como se mostró previamente, el NG y PG poseen distinta sensibilidad a la modificación de la densidad en fréjol, indicando que el PG en frejol es un rasgo estable en comparación con el NG.

Nuestros resultados concuerdan con estudios realizados en cereales de clima templado (Reynolds y col., 2021), donde el rendimiento se relaciona mejor con el número de granos mientras que el PG es insensible o responde marginalmente cuando se modifican el aporte de recursos durante el llenado de granos (Serrago y col., 2013; Aisawi y col., 2015; Bonelli y col., 2020).

Los resultados del presente estudio indican que el frejol, así como en otros cultivos de grano como los cereales, también está limitado por el destino o sumidero, debido a que la modificación de los recursos de la fuente, como consecuencia del cambio en el número de plantas por unidad de superficie, modificaron el rendimiento principalmente por cambios en el NG y no en el PG. Estos resultados apoyan la idea de que la poca variación observada en el PG puede reflejar una respuesta evolutiva adaptativa, y que la reducción de la variabilidad intraespecífica del tamaño y peso de la semilla permitiría un tamaño de semilla óptimo, equilibrando la supervivencia de los individuos y el número de progenie producida como indican Sadras y Denison (2009) y Sadras y Slafer (2012).

Incrementar el rendimiento del fréjol implicaría aumentar sus dos componentes para evitar posibles compensaciones entre el NG y PG; sin embargo, tradicionalmente el mejoramiento de los cultivos de grano se ha enfocado en aumentar el NG (Mason y col., 2008; Sadras y Lawson, 2011), mientras que el PG ha tenido menos atención (Castillo, Vásquez y Calderini, 2017). La escasa variabilidad del PG encontrada en este estudio resalta la necesidad de mejorar este componente, lo que podría ayudar a incrementar el rendimiento en el cultivo de frejol.

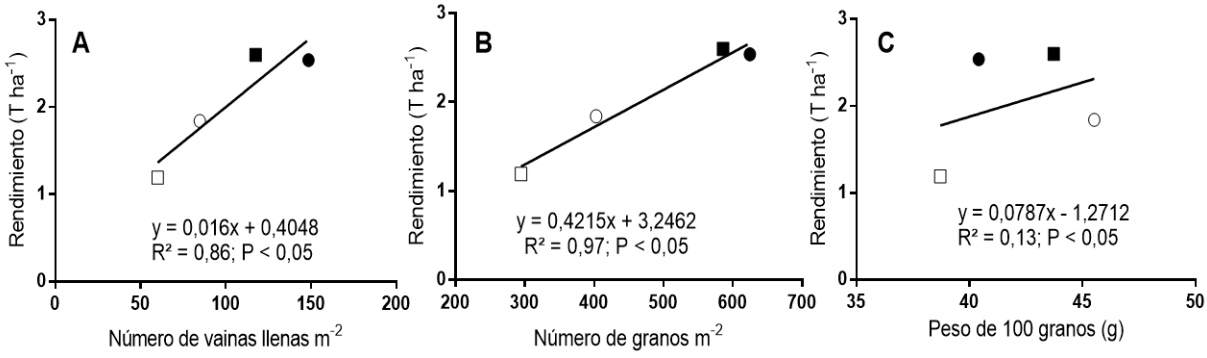

Figura 3. Relación entre el rendimiento y el número de vainas m^{-2} (A), el número de granos m^{-2} (B), y el peso de 100 de granos (C). Los círculos representan el experimento 1 y los cuadrados el experimento 2; símbolos llenos indican densidad 11 plantas^{-2} y símbolos vacíos indican densidad 4 plantas m^{-2}. Cada punto es promedio de tres repeticiones

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

4 Conclusiones

En los dos experimentos el aumento de la densidad de plantas de frejol desde 4 hasta 11 plantas m^{-2} condujo a incrementos en el rendimiento de grano en promedio $\approx 70\,\%$ en los dos experimentos. Se evidenció una respuesta distinta de los componentes del rendimiento a la modificación de la densidad de plantas. El NG es altamente sensible y se incrementó en $\approx 73\,\%$, producto del aumento en el número de vainas por unidad de superficie en alta densidad, además, el NG está estrechamente asociado con el rendimiento final del grano ($R^2 = 0{,}97$), mientras que el peso del grano no estuvo afectado por la modificación de la densidad de plantas, alcanzando en promedio 42 ± 3 g en todos los tratamientos.

Hasta la actualidad, son escasas las evidencias que hayan cuantificado la respuesta de los componentes numéricos del rendimiento de fréjol y su asociación con el rendimiento final bajo una aproximación ecofisiológica en ambientes andinos, donde las condiciones de suelo y clima difieren significativamente con estudios previos. Por lo tanto, estos resultados constituyen una base para diseñar estrategias orientadas a incrementar el rendimiento de este importante cultivo en estas condiciones agroclimáticas, sobre todo para mejorar el peso y tamaño de grano que tiene poca respuesta a la oferta de recursos.

Agradecimientos

Los autores agradecen a Franco Guillen, Yomara Fernández, Ángel Sánchez y Andrés Salinas por la asistencia técnica en los experimentos de campo. Lucia Quichimbo del Laboratorio de Fisiología Vegetal, así como a Diana Iñiguez y Fernanda Livisaca del Laboratorio de Suelos y Agua de la Universidad Nacional de Loja por las facilidades prestadas para el procesamiento y análisis del material vegetal.

Contribución de los autores

SCV; Conceptualización, Análisis formal, Supervisión, Escritura-borrador original, Escritura–revisión y edición. EIVS; Investigación, Curación de datos, Escritura – borrador original. AGG; Investigación. MMM; Investigación, Escritura-revisión y edición. CAMU; Escritura-revisión y edición.

Referencias

Abubaker, S. (2008). «Effect of plant density on flowering date, yield and quality attribute of bush beans (Phaseolus vulgaris L.) under center pivot irrigation system». En: *American Journal of Agricultural and Biological Science* 3.4, 666-668. Online:https://bit.ly/3Tl5xQq.

Ahmed, N., M. Razaq y H. Alam (2016). «Response of French Bean Cultivars to Plant Spacing Under Agroclimatic Condition of Baffa». En: *Journal of Northeast Agricultural University (English Edition)* 23.1, 16-19. Online:https://bit.ly/3DOSEIx.

Aisawi, K. y col. (2015). «The physiological basis of the genetic progress in yield potential of CIMMYT spring wheat cultivars from 1966 to 2009». En: *Crop Science* 55.4, 1749-1764. Online:https://bit.ly/3fN1JcW.

Andrade, F. y P. Abbate (2005). «Response of maize and soybean to variability in stand uniformity». En: *Agronomy Journal* 97.4, 1263-1269. Online:https://bit.ly/3zWdMf2.

Bennett, J., M. Adams y C. Burga (1977). «Pod Yield Component Variation and Intercorrelation in Phaseolus vulgaris L. as Affected by Planting Density 1». En: *Crop science* 17.1, 73-75. Online:https://bit.ly/3UnlczR.

Boada, R. y J. Espinosa (2016). «Factores que limitan el potencial de rendimiento del maíz de polinización abierta en campos de pequeños productores de la Sierra de Ecuador». En: *Siembra* 3.1, 67-82. Online:https://n9.cl/odt9v.

Bonelli, L. y col. (2020). «Does the photo-thermal environment limit post-flowering maize growth?» En: *Field Crops Research* 252, 107805. Online:https://bit.ly/3zYfsVf.

Bustamante, D. (2017). «Escenario de cambio climático a nivel de subcuencas hidrográficas para el año 2050 de la provincia de Chimborazo-Ecuador». En: *La Granja. Revista de Ciencias de la Vida* 26.2, 15-27. Online:https : / / bit . ly / 3FZEC9G.

Calero-Hurtado, A. y col. (2018). «Efecto de cuatro densidades de siembra en el rendimiento agrícola del frijol común (Phaseolus vulgaris L.)» En: *Revista de la Facultad de Ciencias* 7.1, 88-100. Online:https://bit.ly/3NOmh1g.

Castillo, F., S. Vásquez y D. Calderini (2017). «Does the pre-flowering period determine the potential grain weight of sunflower?» En: *Field Crops*

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Research 212, 23-33. Online:https : / / bit . ly / 3UE1PlR.

Celmeli, T. y col. (2018). «The nutritional content of common bean (Phaseolus vulgaris L.) landraces in comparison to modern varieties». En: *Agronomy* 8.9, 166. Online:https://bit.ly/3EfPtLq.

Córdova, F. Fernández de, P. Gepts y M. López (1986). *Etapas de desarrollo de la planta de fríjol común (Phaseolus vulgaris L.)* Centro Internacional de Agricultura Tropical.

De Bruin, J. y P. Pedersen (2009). «New and old soybean cultivar responses to plant density and intercepted light». En: *Crop science* 49.6, 2225-2232. Online:https://n9.cl/chfvs.

Egli, D. (1988). «Plant density and soybean yield». En: *Crop Science* 28.6, 977-981. Online:https : / / bit.ly/3TneBUK.

Escalante-Estrada, J., M. Rodríguez-González e Y. Escalante-Estrada (2015). «Nitrógeno, distancia entre surcos, rendimiento y productividad del agua en dos cultivares de frijol». En: *Bioagro* 27.2, 75-82. Online:https://n9.cl/p9iqk.

FAOSTAT (2019). *Producción agrícola. FAOSTAT WebSite. Online:https://bit.ly/3g1oFmG*.

Foulkes, M. y col. (2011). «Raising yield potential of wheat. III. Optimizing partitioning to grain while maintaining lodging resistance». En: *Journal of experimental botany* 62.2, 469-486. Online:https: //bit.ly/3WPPNaX.

Gabisa, M., E. Ejara y Z. Misgana (2017). «Effect of phosphous application and plant density on yield and yield components of haricot bean (Phaseolus vulgaris L.) at Yabello southern Ethiopia». En: *International Journal of Scientific Engineering and Applied Science* 3.3, 207-2019. Online:https://bit.ly/324uPKA.

Ghobadi, M. y col. (2006). «Short and long periods of water stress during different growth stages of canola (Brassica napus L.): effect on yield, yield components, seed oil and protein contents». En: *Journal of Agronomy* 5.2, 336-341. Online:https:// scialert.net/abstract/?doi=ja.2006.336.341.

Goyes, D. (2014). «Evaluación de la aclimatación de 10 cultivares de fréjol arbustivo (Phaseolus vulgaris L), a campo abierto en Pisin, cantón Riobamba, provincia de Chimborazo». Tesis de mtría. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Hadi, H. y col. (2006). «Response of common bean (Phaseolus vulgaris) to different levels of shade». En: *Journal of Agronomy* 5.4, 595-599. Online:https://bit.ly/3d8MbvY.

Kruk, B. y E. Satorre (2003). «Producción de cultivos de granos. Bases funcionales para su manejo». En: Universidad de Buenos Aires. Cap. Densidad y arreglo espacial del cultivo, págs. 279-318.

Labra, M. y col. (2017). «Plasticity of seed weight compensates reductions in seed number of oilseed rape in response to shading at flowering». En: *European Journal of Agronomy* 84, 113-124. Online:https://bit.ly/3DP50Ax.

Lake, L. y col. (2019). «Yield determination and the critical period of faba bean (Vicia faba L.)» En: *Field Crops Research* 241, 107575. Online:https:// bit.ly/3DZjOg4.

Luo, Q. (2011). «Temperature thresholds and crop production: a review». En: *Climatic change. Online:https://bit.ly/3hBpXHS* 109.3, págs. 583-598.

Mason, S. y col. (2008). «Yield increase has been more rapid for maize than for grain sorghum». En: *Crop Science* 48.4, 1560-1568. Online:https://bit. ly/3WSmggT.

Mondo, V. y A. Nascente (2018). «Produtividade do feijão-comum afetado por população de plantas». En: *Agrarian* 11.39, 89-94. Online:https: / / bit.ly/3DULMcN.

Ngouajio, M., J. Foko y D. Fouejio (1997). «The critical period of weed control in common bean (Phaseolus vulgaris L.) in Cameroon». En: *Crop Protection* 16.2, 127-133. Online:https: / / bit.ly / 3DW7UmX.

Osuna, E. y col. (2012). «Rendimiento de frijol Pinto Saltillo en altas densidades de población bajo temporal». En: *Revista mexicana de ciencias agrícolas* 3.7, 1389-1400. Online:https : / / bit . ly / 3A4mQOY.

Parreira, M., P. Alves y L. Peñaherrera-Colina (2011). «Influencia de las malezas sobre el cultivo de frijol en función de espaciamiento y de la densidad de plantas». En: *Planta Daninha* 29, 761-769. Online:https://bit.ly/3TrdcwC.

Peltonen-Sainio, P. y col. (2007). «Grain number dominates grain weight in temperate cereal yield determination: evidence based on 30 years of multi-location trials». En: *Field Crops Research* 100.2-3, 179-188. Online:https://bit.ly/3hy2lUo.

Pereira, H. y col. (2017). «Genetic, environmental and genotype x environment interaction effects on the common bean grain yield and commercial quality». En: *Semina: Ciências Agrárias* 38.3, 1241-1250. Online:https://bit.ly/3A5vz3v.

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Puente, H. (2009). «Efecto de la densidad de siembra en el sistema de hileras pares en el rendimiento del frijol (Phaseolud vulgaris L.) variedad Red Kidney en condiciones de Tingo María». Tesis de mtría. Universidad Nacional Agraria de la Selva.

Reynolds, M. y col. (2021). «Addressing research bottlenecks to crop productivity». En: *Trends in Plant Science* 26.6, 607-630. Online:https://bit.ly/3TrX65K.

Sadras, V. y R. Denison (2009). «Do plant parts compete for resources? An evolutionary viewpoint». En: *New Phytologist* 183.3, 565-574. Online:https://bit.ly/3hA6IOz.

Sadras, V. y C. Lawson (2011). «Genetic gain in yield and associated changes in phenotype, trait plasticity and competitive ability of South Australian wheat varieties released between 1958 and 2007». En: *Crop and Pasture Science* 62.7, 533-549. Online:https://bit.ly/3G6dBkT.

Sadras, V. y G. Slafer (2012). «Environmental modulation of yield components in cereals: Heritabilities reveal a hierarchy of phenotypic plasticities». En: *Field crops research* 127, 215-224. Online:https://bit.ly/3TqJDew.

Sadras, Victor O (2007). «Evolutionary aspects of the trade-off between seed size and number in crops». En: *Field Crops Research* 100.2-3, 125-138. Online:https://bit.ly/3hwWEpM.

Serrago, R. y col. (2013). «Understanding grain yield responses to source-sink ratios during grain filling in wheat and barley under contrasting environments». En: *Field Crops Research* 150, 42-51. Online:https://bit.ly/3G5ZPyN.

Sistema de Información Publica Agropecuaria de Ecuador (2018). *Boletín Situacional Fréjol Tierno y Seco*.

Slafer, G. y H. Rawson (1994). «Sensitivity of wheat phasic development to major environmental factors: a re-examination of some assumptions made by physiologists and modellers». En: *Functional Plant Biology* 21.4, 393-426. Online:https://bit.ly/3TljNss.

Slafer, G., R. Savin y V. Sadras (2014). «Coarse and fine regulation of wheat yield components in response to genotype and environment». En: *Field Crops Research* 157, 71-83. Online:https://bit.ly/3ElW476.

Soratto, R. y col. (2017). «Plant density and nitrogen fertilization on common bean nutrition and yield». En: *Revista caatinga* 30, págs. 670-678.

Valarezo, O. y col. (2008). «Diagnóstico de la "mosca blanca" en Ecuador». En: *La Granja. Revista de Ciencias de la Vida* 7.1, 13-20. Online:https://bit.ly/3Ek4XhB.

Vásquez, S., C. Mestanza y R. Riegel (2015). «Caracterización de secuencias de los genes Ahas y psbA relacionados con resistencias a herbicidas en Lupinus albus L.» En: *Agro Sur* 43.1, 31-40. Online:https://bit.ly/3tqeTzC.

Véliz, D. y col. (2021a). «Aplicación de sistemas de nitrógeno en el rendimiento de quinua adaptada a sistemas tecnológicos». En: *Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologias de Informação* E44, 119-131. Online:https://bit.ly/3WRcE67.

Véliz, D. y col. (2021b). «Phosphorus availability and solar radiation efficiency in carrot (Daucus carota L.) cultivation in volcanic soils.» En: *Revista Científica Interdisciplinaria Investigación y Saberes* 11.2, 44-65. Online:https://bit.ly/3pZ1Djt.

©2024, 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.

©2024, 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

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). 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>.

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

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.

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.

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

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.

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).

La Granja:*Revista de Ciencias de la Vida* 39(1) 2024:171-176
©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

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 http://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: http://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.

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 <http://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 ar-

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

tículo 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.

©2024, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

La granja:
Revista de Ciencias de la Vida

"Que tus sueños sean mas grandes que tus miedos"
Escarabajo Rinoceronte, especie en peligro de extinción.
Andrés Silva Ordoñez (2024)

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